

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA
PROIZVODNO STROJARSTVO

TOMISLAV MIHALJEVIĆ

MEHANIČKA SVOJSTVA KOMPOZITA S
POLIMERNOM MATRICOM
ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2015.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA
PROIZVODNO STROJARSTVO

TOMISLAV MIHALJEVIĆ

MEHANIČKA SVOJSTVA KOMPOZITA S
POLIMERNOM MATRICOM
ZAVRŠNI RAD

MENTOR:

Tihana Kostadin, mag.ing.stroj.

Karlovac, 2015.

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad na temu *Mehanička svojstva kompozita s polimernom matricom* izradio samostalno koristeći stečeno znanje tijekom studija i upotrebu navedene literature.

Tomislav Mihaljević

Karlovac, 29.06.2015.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mag.ing.stroj. Tihani Kostadin što mi je bila mentor, te što mi je omogućila da izradim završni rad.

Zahvaljujem se svojim roditeljima što su mi omogućili školovanje i svojoj supruzi na bezuvjetnoj podršci tijekom studija.

SAŽETAK

Završni rad sastoji se od dva dijela, teorijskog i eksperimentalnog. U teorijskom dijelu rada opisane su vrste kompozitnih materijala s posebnim naglaskom na vlaknima ojačane kompozite, kompozite s polimernom matricom i proizvodnju polimernih kompozita. Također su opisani materijali ojačala i biokompoziti.

U eksperimentalnom dijelu završnog rada opisana je izrada kompozita s dvokomponentnom epoksidnom smolom kao matricom, te jutenim i staklenim vlaknima kao ojačalom. Nakon izrade uzorci su podvrgnuti satičko vlačnom ispitivanju na kidalici.

SUMMARY

The dissertation consists of two parts, theoretical and experimental. In theoretical part of dissertation types of composite materials are described with special emphasis on fiber reinforced composites, composites with a polymer matrix and production of polymer composites. Also described are reinforcement materials and biocomposites.

The experimental part of dissertation describes the production of composites with two component epoxy resin as matrix with jute and glass fibers as an reinforcement. After samples were made they were static tensile tested on the testing machine.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS OZNAKA

POPIS PRILOGA

1. UVOD	1
2 . KOMPOZITNI MATERIJALI	2
2.1. Vrste kompozitnih materijala	2
2.2. Vlaknima ojačani kompoziti	5
2.2.1. Predviđanje svojstva vlaknima ojačanih kompozita	6
2.2.2. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita	7
2.3. Kompoziti s česticama	10
2.4. Sendvič konstrukcije	11
2.5. Slojeviti kompozitni materijali	12
2.6. Materijali ojačanja	14
2.6.1. Staklena vlakna	14
2.6.2. Jutena vlakna	16
3. KOMPOZITI S OBZIROM NA MATERIJAL MATRICE	18
3.1. Kompoziti s metalnom matricom	18
3.2. Kompoziti s keramičkom matricom	19
3.3. Kompoziti s polimernom matricom	20
3.3.1. Svojstva polimernih kompozita	21
4. MATRICE	23
4.1. Funkcije i svojstva matrice	23
4.2. Materijali matrice	26
4.2.1. Epoksidne smole	26
4.2.2. Poliesterske smole	27
4.2.3. Vinil esteri	28
4.2.4. Fenolne smole	28
4.2.5. Bizmaleimidi	29
4.2.6. Poliimidne smole	29
4.2.7. Cianatne smole	30

4.2.8. Polifenilen sulfide	30
4.2.9. Polieterimid	30
5. POSTUPCI PROIZVODNJE POLIMERNIH KOMPOZITA	31
5.1. Uvodno o proizvodnji polimernih kompozita	31
5.2. Preprezi	31
5.2.1. Skrućivanje preprega pri nižim temperaturama	32
5.3. Ručno polaganje	33
5.4. Podtlačno oblikovanje	34
5.5. Namatanje vlakana	35
5.6. Ubrizgavanje smole u kalup	37
5.7. Infuzija sloja smole	38
6. BIOKOMPOZITI	40
6.1. Prednosti i nedostaci biokompozita	40
6.2. Postupci proizvodnje biokompozita	41
7. POSTAVKA ZADATKA	43
8. EKSPERIMENTALNI DIO	44
8.1. Izrada uzoraka	44
8.2. Ispitivanje statičke vlačne čvrstoće	46
8.3. Rezultati ispitivanja	50
8.4. Analiza rezultata	52
9. ZAKLJUČAK	55
LITERATURA	56
PRILOZI	58

POPIS SLIKA

Slika 1. Usporedba osnovnih tipova kompozita: (a) kompoziti s česticama, (b) kompoziti s vlaknima, (c) slojeviti kompoziti	2
Slika 2. Ovisnost omjera "granica tečenja kompozita-granica tečenja matrice" o promjeru čestica- d_p , te omjeru l/d_f - duljina vlakana/promjer vlakana	4
Slika 3. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, (b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, (c) ortogonalno raspoređena vlakna, (d) višesmjerno usmjerena vlakna	5
Slika 4. Dijagram "naprezanje-istezanje" vlaknima ojačanog kompozita	6
Slika 5. Utjecaj volumnog udjela vlakna bor-silicij-karbida na svojstvo ojačanog aluminija	7
Slika 6. Utjecaj usmjerenja vlakana obzirom na naprezanje na Ti-leguru ojačanu vlaknima bora	8
Slika 7. Svojstva vlakana: (a) krivulja "naprezanje-istezanje", (b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana	9
Slika 8. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita	9
Slika 9. Kompozitni sendvič s jezgrom u obliku pčelinjih saća	12
Slika 10. Postupak proizvodnje Glare laminate	13
Slika 11. Strukovi staklenog vlakna	15
Slika 12. Stakleni mat 400g/m^2	15
Slika 13. Snopovi jute	16
Slika 14. Prikaz poboljšanih svojstava polimernih kompozita	22
Slika 15. Postupak izrade kompozita u autoklavu	32
Slika 16. Postupak skrućivanja preprega pri nižim temperaturama	33
Slika 17. Postupak ručnog polaganja	34
Slika 18. Postupak podtlačnog oblikovanja	35
Slika 19. Prikaz vijčanog, prstenastog (obodnog) i polarnog namotavanja	36
Slika 20. Cijevi od polimernog kompozita proizvedene namatanjem	37
Slika 21. Postupak ubrizgavanja smole u kalup	37
Slika 22. Postupak infuzije sloja smole	38
Slika 23. Vrste prirodnih vlakana	40
Slika 24. Primjena biokompozita	42
Slika 25. Dimenzije epruvete zadane normom ISO 527-4	44

Slika 26. Postupak izrade kompozitnih ploča	45
Slika 27. Slika izrađenih kompozitnih ploča	45
Slika 28. Gotovi uzorci	46
Slika 29. Uređaj za statičko vlačno ispitivanje (Shimadzu AG-X)	47
Slika 30. Trapezium X računalni program za testiranje materijala	48
Slika 31. Odabir konstantne vlačne sile	48
Slika 32. Odabir parametara koji će se mjeriti prilikom ispitivanja	49
Slika 33. Odabir vrste materijala i oblika epruvete	49
Slika 34. Odabir vrijednosti sile ispitivanja	50
Slika 35. Izgled uzoraka kompozita s staklenim (lijevo) i jutenim (desno) vlaknima nakon ispitivanja	50
Slika 36. Slojevi vlakana kod kompozita sa jutenim i staklenim vlaknima	53
Slika 37. Hookeov dijagram za kompozit 1 s staklenim vlaknima	53
Slika 38. Hookeov dijagram za kompozit 1 s jutenim vlaknima	54
Slika 39. Površine loma za kompozite 1 sa jutenim i staklenim vlaknima	54

POPIS TABLICA

Tablica 1. Odabrani primjeri kompozita s česticama	4
Tablica 2. Odabrani primjeri kompozita s vlaknima	5
Tablica 3. Tipovi stakla i nazivna svojstva	14
Tablica 4. Pregled svojstva biljnih vlakana u odnosu na staklena vlakna	17
Tablica 5. Mehanička svojstva materijala matrice	24
Tablica 6. Svojstva kompozita s matricom od epoksidne smole	27
Tablica 7. Svojstva kompozita s matricom od poliesterske smole	27
Tablica 8. Svojstva kompozita s matricom od vinilesterske smole	28
Tablica 9. Rezultati ispitivanja kompozita (epoksidna smola s staklenim vlaknima)	51
Tablica 10. Rezultati ispitivanja kompozita (epoksidna smola s jutenim vlaknima)	52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_{ec}	N/mm^2	granica razvlačenja (tečenja) kompozita
R_{em}	N/mm^2	granica razvlačenja (tečenja) matrice
R_{mf}	N/mm^2	vlačna čvrstoća vlakna
V	%	volumni udio
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
E_c	N/mm^2	modul elastičnosti kompozita
E_m	N/mm^2	modul elastičnosti matrice
E_f	N/mm^2	modul elastičnosti vlakna
E	N/mm^2	modul elastičnosti
ε	m/mm, %	istezanje, stupanj deformacije
σ	N/mm^2	naprezanje
ρ	kg/m^3	gustoća
G	Mpa	modul smičnosti
T_g	°C	temperatura staklišta, staklište
α	°C	koeficijent linearnog toplinskog istezanja
R_{mt}	N/mm^2	tlačna čvrstoća
E_s	N/mm^2	savojni modul elastičnosti
R_{ms}	N/mm^2	savojna čvrstoća
h	mm	debljina epruvete
b_1	mm	širina vrata epruvete
b_2	mm	širina glave epruvete
R	mm	radijus
L_0	mm	početna mjerna duljina epruvete
L_1	mm	ispitna duljina epruvete
L	mm	razmak između pakni
L_3	mm	ukupna duljina epruvete
F	N	sila
ϑ	°	temperatura
p	bar	tlak

POPIS PRILOGA

- Prilog 1. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 1 (kompozit s staklenim vlaknima)
- Prilog 2. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 2 (kompozit s staklenim vlaknima)
- Prilog 3. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 3 (kompozit s staklenim vlaknima)
- Prilog 4. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 4 (kompozit s staklenim vlaknima)
- Prilog 5. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 5 (kompozit s staklenim vlaknima)
- Prilog 6. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 1 (kompozit s jutenim vlaknima)
- Prilog 7. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 2 (kompozit s jutenim vlaknima)
- Prilog 8. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 3 (kompozit s jutenim vlaknima)
- Prilog 9. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 4 (kompozit s jutenim vlaknima)
- Prilog 10. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 5 (kompozit s jutenim vlaknima)



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / **specijalistički studij**:.....STROJARSTVO.....
(označiti)

Usmjerenje:.....PROIZVODNO STROJARSTVO.....Karlovac, 07.05.2015.....

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student:.....TOMISLAV MIHALJEVIĆ..... Matični broj:..0111412002.....

Naslov:....MEHANIČKA SVOJSTVA KOMPOZITA S POLIMERNOM MATRICOM.....

.....
Opis zadatka:

U završnom radu nakon kratkog uvoda, potrebno je u teorijskom dijelu rada obraditi kompozitne materijale (vrste i svojstva), sa posebnim naglaskom na kompozite s polimernom matricom.

Također je potrebno obraditi mehanička svojstva kompozitnih materijala.

Nakon postavke zadatka, u eksperimentalnom dijelu napraviti ispitivanje statičke vlačne čvrstoće za dvije vrste kompozitnih materijala na probnim uzorcima, te napraviti analizu rezultata.

Na kraju napisati odgovarajući zaključak. Eksperimentalni dio odraditi u Laboratorijima Veleučilišta u Karlovcu.

Završni rad urediti prema Pravilniku o završnim i diplomskim radovima na Veleučilištu u Karlovcu.

Zadatak zadan:
02.02.2015.

Rok predaje rada:
23.06.2015.

Predviđeni datum obrane:
29.06.2015.

.....
Mentor:

.....
Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

1. UVOD

Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti su dobiveni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Time se mogu postići neobične, odnosno kod drugih materijala neuobičajene kombinacije svojstava, kao što su krutost, čvrstoća, težina, ponašanje pri visokim temperaturama, kemijska postojanost (antikorozivnost), tvrdoća ili vodljivost (električna i toplinska).

Kompoziti s polimernom matricom sastavljeni su od polimerne smole kao matrice, s vlaknima kao komponentom za ojačavanje. Pojam "smola" u ovom se kontekstu koristi za obilježavanje polimera-tvari velike molekulne mase koje treba ojačati. Ovi materijali rabe se u najvećoj mogućoj raznolikosti primjene kompozita, i to obzirom na količinu, obzirom na svojstva pri sobnoj temperaturi, lakoću proizvodnje, te cijenu.

Najraširenije i daleko najjeftnije polimerne smole su poliesteri i vinil esteri. Ovi materijali matrice prvenstveno se primjenjuju kod staklenim vlaknima ojačanih kompozita. Veliki broj formulacija navedenih smola omogućuje širok raspon svojstava ovih polimernih materijala.

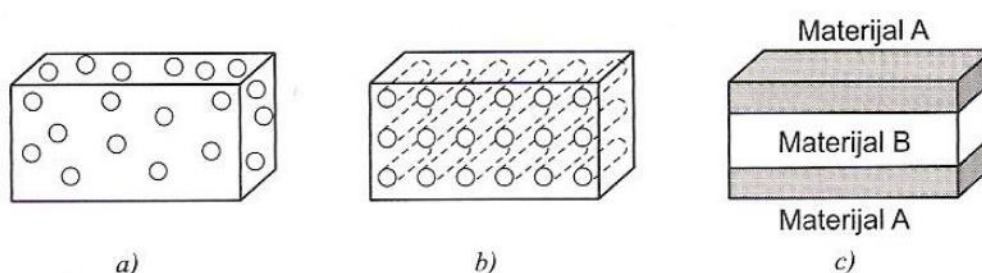
Epoksidne smole znatno su skuplje, te često neprikladne za komercijalnu primjenu. One se u većoj mjeri primjenjuju kod polimernih kompozita u zrakoplovstvu. Ove smole imaju bolja mehanička svojstva, te veću postojanost prema vlazi (u usporedbi s nezasićenim polieseterskim i vinilesterskim smolama). Za visokotemperaturne primjene primjenjuju se poliiimidi. Gornja temperatura dugotrajne primjene iznosi 230 °C. Konačno, visokotemperaturni plastomeri imaju potencijal za buduću primjenu u zrakoplovstvu. Radi se o polietereterketonu (PEEK), polifenilensulfidu (PPS), polieterimidu (PEI) [1, 2].

U današnje vrijeme sve je veća potreba za korištenjem materijala iz obnovljivih izvora, jer njihova proizvodnja, uporaba i odlaganje imaju značajan gospodarski i ekološki utjecaj. Zbog toga je uporaba biokompozita od sve veće važnosti.

2 . KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Vrste kompozitnih materijala

Kompoziti su umjetno proizvedeni višefazni materijali koji imaju željenu kombinaciju najboljih svojstava konstitutivnih faza. Obično, jedna faza (matrica) je kontinuirana i okružuje ostale disperzirane faze. Kompoziti su razvrstani kao: kompoziti s česticama, vlaknima ojačani kompoziti, slojeviti kompoziti i sendvič konstrukcije (slika 1). Slojeviti kompoziti i sendvič konstrukcije nazivaju se "strukturni kompoziti" [1].



Slika 1. Usporedba osnovnih tipova kompozita: (a) kompoziti s česticama, (b) kompoziti s vlaknima, (c) slojeviti kompoziti [2]

Efikasnost ojačanja najveća je kod kompozita s vlaknima (vlaknima ojačanih kompozita). Kod ovih kompozita opterećenje se prenosi i distribuira među vlaknima, i to putem matrice koja je u većini slučajeva osrednje duktilna. Znatno ojačanje ovih kompozita moguće je jedino ako je veza vlakno-matrica jaka. Prema njihovom promjeru vlaknasta ojačala dijelimo na viskere, vlakna i žice. Viskeri su vrlo tanke niti keramičkih monokristala, visoke čistoće koji imaju ekstremno velik omjer "duljina/promjer". Ukoliko su vlakna diskontinuirana, efikasnost ojačanja ovisi o duljini vlakana. Za svaku kombinaciju vlakno-matrica, postoji tzv. kritična duljina, dok duljine kontinuiranih vlakana uvelike premašuju ovu kritičnu vrijednost [2].

Raspored vlakana bitno utječe na svojstva vlaknastih kompozita. Mehanička svojstva kompozita ojačanih kontinuiranim usmjerenim vlaknima su vrlo anizotropna. U smjeru vlakana čvrstoća je maksimalna, dok je u smjeru okomitom na vlakna čvrstoća minimalna. Kod kompozita ojačanih kratkim vlaknima, vlakna mogu biti usmjerena ili slučajno raspoređena. Značajne vrijednosti čvrstoće i krutosti moguće je postići u uzdužnom smjeru

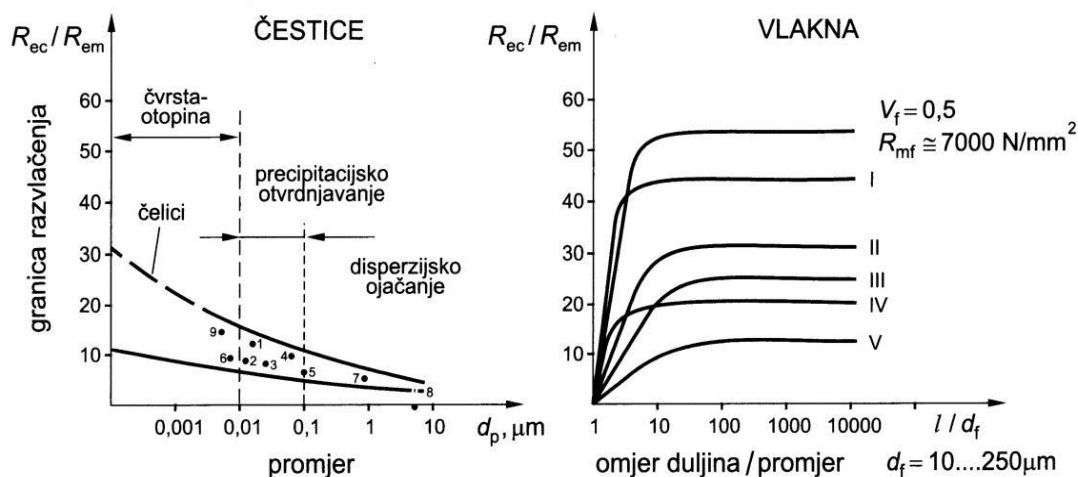
kod spomenutih kompozita. Unatoč nekim ograničenjima na efikasnost ojačanja, kod kompozita ojačanih slučajnim usmjerenim kratkim vlaknima svojstva su izotropna [1].

Vlaknima ojačani kompoziti se prema vrsti matrice mogu podijeliti na polimerne, metalne i keramičke kompozite. Polimerna matrica je najčešća, te može biti ojačana staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima. Radne temperature metalnih kompozita su mnogo više, te se kao ojačala koriste razni tipovi vlakana i viskeri. Značajka mnogih polimernih i metalnih kompozita su visoka specifična čvrstoća (omjer čvrstoće i gustoće) i specifična krutost (omjer modula elastičnosti i gustoće), što se postiže primjenom matrica niske gustoće. Kod keramičkih kompozita razvoj je usmjeren na povećanje lomne žilavosti (otpornosti na naglo širenje napukline). Sljedeća skupina suvremenih kompozita su "ugljik-ugljik" kompoziti. Riječ je o kompozitima koji su načinjeni ulaganjem ugljičnih vlakana u pirolaziranu ugljičnu matricu. Nadalje, značajni su hibridni kompoziti kod kojih se susreće ojačanje s barem dva različita tipa vlakana [2].

Više postupaka izrade kompozita razvijeno je kako bi se osigurao ujednačen raspored vlakana te visoki stupanj njihove usmjerenosti. Pultrudiranje je jedna od tehnologija koja služi za proizvodnju profila konstantnog poprečnog presjeka. Kompoziti koji se koriste u razne konstrukcijske svrhe obično se izrađuju postupcima slaganja slojeva (ručnim ili automatiziranim postupcima) i to tako da se prepreg polaže na kalupnu površinu, te se izlaže povišenoj temperaturi i tlaku.

Prepreg je industrijski pojam za kontinuirano vlaksasto ojačalo koje je predimpregrirano s djelomično otvrdnutom polimernom smolom. Osim slojeva mogu se proizvoditi i šuplji elementi (proizvodi, poluproizvodi), i to postupkom namotavanja vlakana. Spomenuta metoda se sastoji u tome da se smolom natopljena vlakna ili prepreg omotavaju oko modela koji rotira. Paralelno s time može se odvijati umrežavanje matrice (smole), no konačno umrežavanje često se provodi naknadnim ugrijavanjem.

U cilju ilustriranja prednosti kompozita pred drugim materijalima slijedi kratki prikaz utjecaja čestica i vlakana na čvrstoću kompozita, što prikazuje slika 2 [1].



Slika 2. Ovisnost omjera "granica tečenja kompozita-granica tečenja matrice" o promjeru čestica- d_p , te omjeru l/d_f - duljina vlakana/promjer vlakana [1]

Opis slike:

- R_{ec} - granica razvlačenja kompozita,
- R_{em} - granica razvlačenja matrice,
- R_{mf} - vlačna čvrstoća vlakna,
- točka u dijagramu predstavlja ispitivanjem određenu vrijednost,
- krivulje u dijagramu odnose se na proračunom dobivene vrijednosti,
- pretpostavljeno opterećenje paralelno s vlaknima.

U tablicama (1 i 2) prikazani su odabrani primjeri kompozita s česticama i vlaknima.

Tablica 1. Odabrani primjeri kompozita s česticama [1]

Oznaka	Sustav	Volumni udio čestica, V_p
1.	$Ni - Al_2O_3$	0,10
2.	$Al - Al_2O_3$	0,13
3.	$Ag - Al_2O_3$	0,008
4.	$Ni - ThO_2$	0,09
5.	$Ni - Cr_2O_3$	0,08
6.	$Ni - ThO_2$	0,02
7.	$Ni - SiO_2$	0,21
8.	$Ni - TiC$	0,70
9.	$Al - Al_2O_3$	0,08

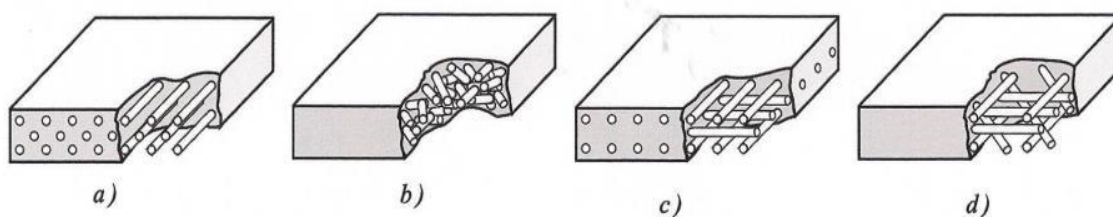
Tablica 2. Odabrani primjeri kompozita s vlaknima [1]

Oznaka	Sustav	Volumni udio vlakana, V_f	Čvrstoća Kompozita, N/mm^2
I	$Al - SiO_2$	0,50	3100
II	$Al - Al_2O_3$	0,35	3200
III	$Ag - Al_2O_3$	0,24	6700
IV	$Cu - W$	0,50	2500
V	Al-nehrđajući čelik	0,20	1550

2.2. Vlaknima ojačani kompoziti

Kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do izražaja poboljšanje čvrstoće, žilavosti, krutosti, te povećanje omjera "čvrstoća/gustoća" uslijed ugradnje čvrstih, krutih i krhkih vlakana u mekaniju, duktilniju matricu. Materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna, te osigurava duktilnost i žilavost, budući vlakna nose veći dio opterećenja.

U uporabi su vrlo raznoliki materijali ojačala. Stoljećima se za ojačanje glinenih opeka rabila slama. Za ojačanje betonskih konstrukcija rabe se čelične šipke. Na osnovi staklenih vlakana ugrađenih u polimernu matricu dobiva se kompozit uporabiv za transportna sredstva, te primjenu u zrakoplovstvu. Vlakna načinjena od bora, ugljika i polimera osiguravaju izrazito ojačavanje. Za ojačanje se rabe i prije spomenuti viskeri. Osim toga, ojačavala mogu biti raspoređena na različite načine (slika 3) [2].



Slika 3. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, (b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, (c) ortogonalno raspoređena vlakna, (d) višesmjerno usmjerena vlakna [2]

2.2.1. Predviđanje svojstva vlaknima ojačanih kompozita

Zakonom miješanja uvijek se može odrediti gustoća vlaknima ojačanih kompozita [1]:

$$\rho_c = V_m \cdot \rho_m + V_f \cdot \rho_f$$

gdje se indeks "m" odnosi na matricu, a indeks "f" na vlakno.

Ako opterećenje djeluje paralelno s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima, zakonom miješanja može se točno predvidjeti modul elastičnosti [1]:

$$E_c = V_m \cdot E_m + V_f \cdot E_f$$

gdje je: E_c – modul elastičnosti kompozita,

E_m – modul elastičnosti matrice,

E_f – modul elastičnosti vlakna,

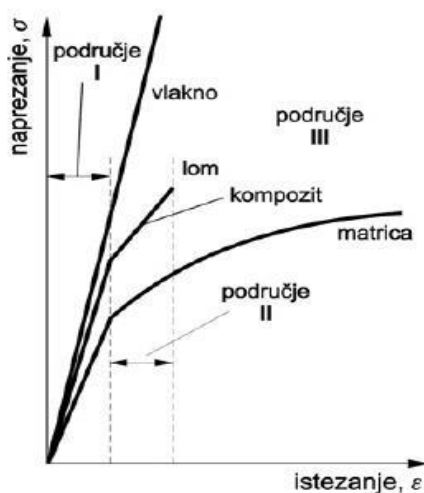
V_m – volumni udio matrice,

V_f – volumni udio vlakna.

Pri visokim naprezanjima započinje deformiranje matrice, te veza između naprezanja i istezanja više nije linearna (slika 4) [1].

U slučaju kada opterećenje djeluje okomito na smjer vlakana, komponente djeluju neovisno jedna o drugoj. Modul elastičnosti može se predvidjeti izrazom [1]:

$$1/E_c = V_m/E_m + V_f/E_f$$



Slika 4. Dijagram "naprezanje-istezanje" vlaknima ojačanog kompozita [2]

Čvrstoća kompozita ovisi o vezama između vlakana i matrice, te je ograničena deformiranjem matrice. Posljedica ovih okolnosti je da je utvrđena čvrstoća gotovo uvijek manja od predviđene zakonom miješanja. Druga svojstva, kao npr. duktilnost (plastičnost),

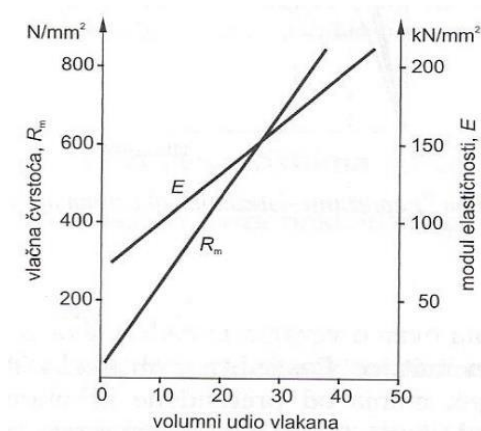
ponašanje pri udaru (žilavost), ponašanje pri dinamičkom (umor materijala) i dugotrajnom statičkom opterećenju (puzanju materijala) predviđaju se teže nego vlačna čvrstoća.

Svojstva vlaknastih kompozita znatno se teže predviđaju ako su vlakna diskontinuirana. Tomu je tako zbog toga što krajevi svakog vlakna nose manje opterećenja nego srednji dio vlakna. Drugim riječima, ispitivanjem utvrđena čvrstoća biti će manja od one proračunate primjenom zakona miješanja. Odstupanje je manje ukoliko je stvarna duljina vlakna " l " veća od kritične duljine " l_c ", odnosno preciznije ukoliko je odnos "duljina/promjer" vlakna " l/d " veći od kritičnog. Veličina ovog omjera bitno utječe na svojstva kompozita. Npr. poliamid ojačan ugljičnim vlaknima odnosa $l/d = 30$ ima čvrstoću 110 N/mm^2 , a vlaknima veće duljine ($l/d = 800$) postiže se čvrstoća od 240 N/mm^2 [1].

2.2.2. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita

Pri konstruiranju vlaknima ojačanih kompozita potrebno je uzeti u obzir brojne faktore. Kontinuirana vlakna koja vode do najboljih svojstava često se teško proizvode, te također teško ugrađuju u matricu. Diskontinuirana vlakna s velikim omjerom „duljina/promjer“ znatno se lakše ugrađuju u matricu dovodeći tako do materijala visoke krutosti i čvrstoće.

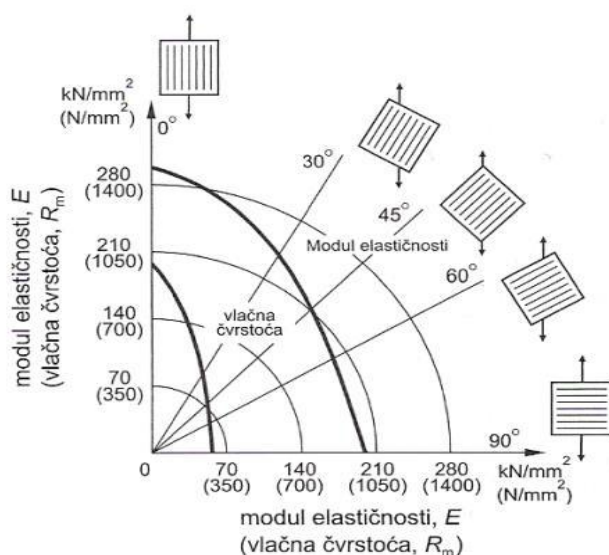
Volumni udio vlakana vodi do povećanja čvrstoće i krutosti kompozita (slika 5). Gornja granica od oko 40% određena je sposobnošću, odnosno mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice [2].



Slika 5. Utjecaj volumnog udjela vlakna bor-silicij-karbida na svojstvo ojačanog aluminija

[2]

Jednosmjerna vlakna imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima (slika 6). Ipak, kao što je prikazano primjerom, svojstva kompozita mogu biti vrlo anizotropna. Umjesto u jednom smjeru, vlakna se mogu polagati ortogonalno ili pod nekim drugim kutom, čime se žrtvuje maksimalna čvrstoća, ali se postižu jednoličnija svojstva kompozita [2].



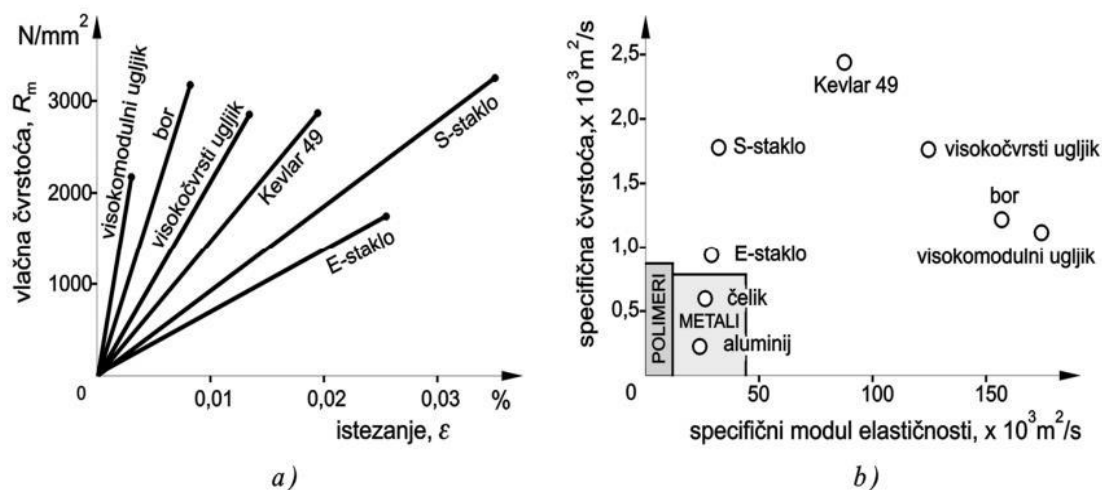
Slika 6. Utjecaj usmjerenja vlakana obzirom na naprezanje na Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [2]

Vlakna trebaju biti čvrsta, kruta, lagana, a također trebaju imati visoko talište. Specifična čvrstoća i specifični modul elastičnosti materijala definirani su izrazima [2]:

$$\text{Specifična čvrstoća} = R_m(R_e)/\rho$$

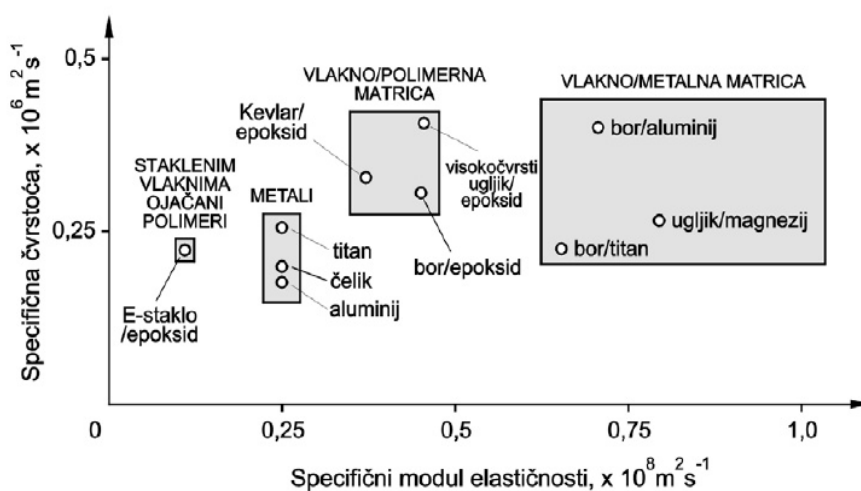
$$\text{Specifični modul elastičnosti} = E/\rho$$

Kao materijali za vlakna preferiraju se materijali visokog specifičnog modula elastičnosti ili čvrstoće. Neki karakteristični podaci za svojstva ojačala prikazani su na slici 7.



Slika 7. Svojstva vlakana: (a) krivulja "naprezanje-istezanje", (b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana [2]

Uobičajeno je da su materijali matrice žilavi i duktilni tako da prenose opterećenje na vlakna, te sprečavaju da napukline od prekinutih vlakana napreduju kroz cijeli kompozit. Matrica također treba biti čvrsta tako da pridonosi sveukupnoj čvrstoći kompozita. U konačnici na prikladnost matrice utječe talište. Polimeri se mogu primjenjivati do maksimalne temperature od 80 °C za nezasićene poliesterske smole, pa do 315 °C za poliamide. Metalne matrice dopuštaju više radne temperature [2]. Na slici 8. uspoređeni su specifični modul elastičnosti i specifična čvrstoća pojedinih kompozita s metalima.



Slika 8. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita [2]

2.3. Kompoziti s česticama

Za ojačanje kompozitnog materijala mogu se upotrijebiti ne samo vlakna, već i čestice od tvrdog i krhkog materijala koje su jednolično raspoređene u mekanijoj i duktilnijoj matrici. Ta je struktura slična onoj mnogih dvofaznih disperzijski ojačanih metalnih legura. Ipak, kod kompozita se za ugradnju disperziranih čestica ne primjenjuje transformacija faza [1, 3].

S obzirom na veličinu čestica i način na koji utječu na ukupna svojstva kompozita, kompozite s česticama možemo podijeliti u dvije velike skupine [3]:

- kompoziti s disperzijom (malim česticama) (čestice $< 0,1 \mu\text{m}$),
- kompoziti s velikim česticama (čestice $> 1 \mu\text{m}$).

Kod kompozita s disperzijom, povišena čvrstoća postiže se ekstremno malim česticama disperzirane faze koje usporavaju gibanje dislokacija. Razmatranje ovog mehanizma očvršćivanja je na nivou atoma. Kod kompozita s velikim česticama mehanička svojstva su poboljšana djelovanjem samih čestica. Volumni se udjel čestica kod kompozita s disperzijom kreće do 15 %, a za kompozite s velikim česticama taj je udjel veći od 20 %. Jedna od najvažnijih razlika između kompozita s česticama i onih s vlaknima direktno proizlazi iz njihove građe. Kompoziti s česticama općenito su izotropni, tj. njihova svojstva (čvrstoća, krutost itd.) identična su u svim smjerovima, za razliku od kompozita s vlaknima koji su često anizotropni, te svojstva variraju s obzirom na položaj vlakna. Anizotropnost se može djelomično prevladati slaganjem više slojeva ojačanja različite orijentacije pri čemu se dobiva slojeviti kompozit [1, 3].

Male čestice disperzirane su u matrici, a dimenzije su im od 10 nm do 250 nm. Svojom prisutnošću male čestice ometaju gibanje dislokacija matrice, te je na taj način ojačavaju. Kompoziti s dodanim malim česticama se zbog toga nazivaju disperzijski ojačanim kompozitima. Za učinkovito ometanje gibanja dislokacija matrice, disperzirane male čestice moraju biti tvrde (oksidi metala), a učinak ojačanja osim o tvrdoći ovisi i o veličinama, oblicima, količinama i raspodjelama disperziranih čestica. U materijalu matrice se disperzirane čestice ne smiju otapati niti s njom kemijski reagirati. S druge strane male čestice moraju biti čvrsto povezane s materijalom matrice [4].

Pri sobnoj temperaturi disperzijom ojačani kompoziti nisu čvršći od dvofaznih metalnih legura. Međutim, budući da do katastrofalnog omekšavanja disperzijom ojačanih kompozita ne dolazi pri pregrijavanju, porastu zrna ili povećanju disperzirane faze, čvrstoća kompozita postupno se snižava s povećanjem temperature. Osim toga, postojanost prema

puzanju ovih kompozita veća je od one kod precipitacijski očvrnutih legura. Za stabilnost pri visokim temperaturama disperzirana faza ne smije biti gruba (krupna) [1].

Svojstva disperzijom ojačanih kompozita mogu se optimirati uzimanjem u obzir sljedećih smjernica [1]:

- disperzirana (raspršena) faza, tipičan primjer je tvrd i stabilan oksid, treba biti djelotvorna zapreka klizanju (smicanju),
- materijal koji služi kao disperzija treba biti optimalne veličine, oblika, raspodjele i udjela (količine),
- disperzirani materijal treba biti male rastvorljivosti u materijalu matrice (npr. Al_2O_3 ne otapa se u aluminiju, dakle taj materijal je djelotvoran dispergent za legure aluminija),
- između matrice i raspršenog materijala treba postojati dobra povezanost (slaba rastvorljivost raspršenog materijala u matrici može doprinijeti dobrim i čvrstim vezama).

Dodane velike čestice ne mogu učinkovito spriječiti gibanje dislokacija matrice, te na taj način ne ojačavaju matricu. Pri opterećivanju kompozita jednako se deformiraju matrica i dodane čestice, ali se u matrici i dodanim česticama javljaju različita naprezanja. Kako bi se snizila cijena proizvoda, često se kompozit formira uz dodavanje matrici jeftinijih velikih čestica [4].

2.4. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije sastoje se od dva čvrsta i kruta tanka vanjska sloja između kojih se nalazi materijal male mase (za popunjavanje) koji čini jezgru (trodimenzionalni dodatak - vlakna su jednodimenzionalna, slojevi dvodimenzionalni), koja je prije svega namijenjena povećanju čvrstoće i krutosti pri savojnom i smičnom poprečnom, te lokalnom tlačnom opterećenju. Niti materijal za popunjavanje, niti vanjski slojevi ne trebaju biti čvrsti niti kruti, a sendvič posjeduje oba ta svojstva. Zahvaljujući maloj masi, sendvič konstrukcije odlikuje visoka specifična čvrstoća i visoka specifična krutost [1, 3, 5].

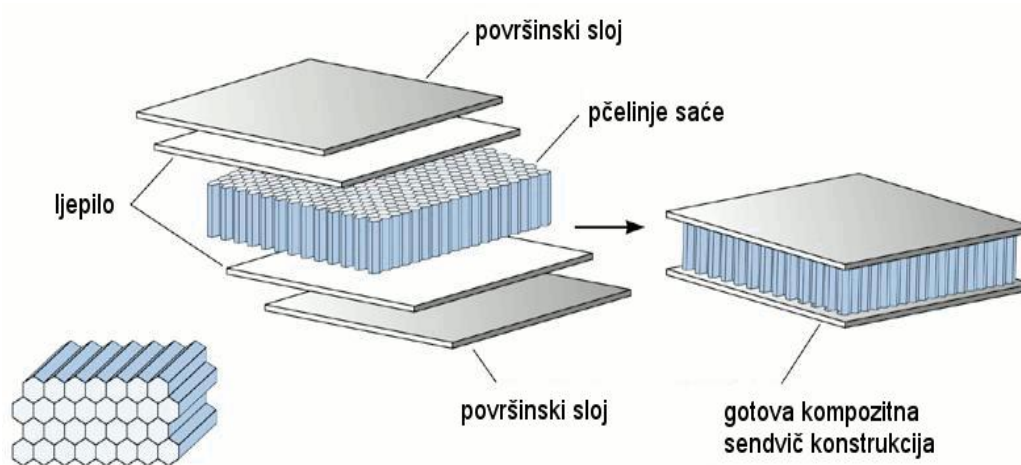
Poznat je primjer sendvič konstrukcije valoviti kartonski papir – s obje strane valovite jezgre zalijepljen je ravni papir veće debljine (karton). Niti valovita jezgra, niti površinski slojevi papira nisu kruti, ali njihova kombinacija jest [3, 5].

Kao materijali jezgre rabe se [3]:

- polimerne pjene od poli(vinil-klorida) (PVC), polistirena (PS), poliuretana (PUR), poli(eter-imida) (PEI), akrilne pjene, primjenjuju se pjene gustoće od 40 kg/m^3 do 200 kg/m^3 i debljine od 5 mm do 50 mm,
- aluminij ili polimerni kompoziti (aramidna vlakna u kombinaciji s akrilnitril/butadien/stirenskom (ABS), polikarbonatnom (PC), polipropilenskom (PP) ili polietilenskom (PE) matricom) u izradi saća, drvo (balza, cedar).

Površinski slojevi mogu biti, a često i jesu, načinjeni od materijala više čvrstoće i krutosti. Za vanjske slojeve preferiraju se legure aluminija, polimerni kompoziti ojačani vlaknima, titanove legure i čelik [3].

U zrakoplovstvu je osobito značajna struktura sendvič konstrukcije u obliku pčelinjeg saća koja sadrži aluminijsku jezgru oblika saća položenu između tankih vanjskih slojeva, najčešće aluminijske folije (limova) ili laminata, slika 9. Time se dobiva vrlo postojan, krut, čvrst i izuzetno lagan sendvič koji je zahvaljujući svojim prednostima široko primjenjiv u izradi zrakoplovnih konstrukcija [3].



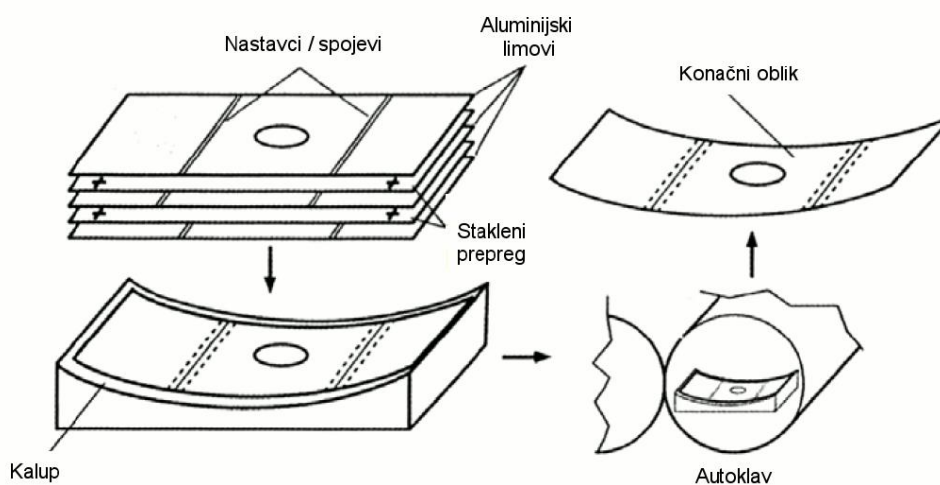
Slika 9. Kompozitni sendvič s jezgrom u obliku pčelinjih saća [6]

2.5. Slojeviti kompozitni materijali

Slojeviti (laminatni) kompoziti ili laminati sadrže više slojeva ojačanja položenih u matricu. Laminati su, osim u vrlo specifičnim slučajevima, još uvijek anizotropni, ali razlika između svojstava za različite smjerove nije toliko značajna kao kod kompozita s jednosmjernim vlaknima. Na temelju ovog pristupa razvijaju se laminati s tako orijentiranim

slojevima koji osiguravaju najbolja svojstva u smjeru djelovanja opterećenja. Time se ostvaruje ušteda na materijalu i prema tome na masi što je čimbenik od primarne važnosti u zrakoplovnoj industriji [3].

U zrakoplovstvu se često rabe slojeviti kompoziti poznati kao “Glare” laminati (e. *GLAss-REinforced fibre metal laminate*), slika 10. Takvi laminati sadrže aluminijske limove dodatno ojačane staklenim vlaknima. Polaganjem preprega (staklene tkanine natopljene polimernom smolom) između aluminijskih limova dobiva se višeslojna struktura koja sadrži nekoliko redova ojačanja [3].



Slika 10. Postupak proizvodnje Glare laminata [3]

Nakon polaganja vlakana limovi se međusobno spajaju i nakon oblikovanja u kalupu, materijal se izlaže povišenoj temperaturi i tlaku kako bi polimerna smola omekšala i polimerizirala čvrsto vezujući aluminijske slojeve. Mehanička svojstva takvog kompozita određena su smjerom orijentacije vlakana u pojedinim slojevima. Zato se kod ugradnje Glare laminati moraju tako orijentirati da imaju najveću mehaničku otpornost upravo u smjeru djelovanja najvećih vanjskih opterećenja. Višeslojno ojačane Glare laminate u principu odlikuje značajno viša čvrstoća u odnosu na klasične aluminijske legure uz zadržavanje male mase [3].

2.6. Materijali ojačanja

Kao ojačanje u kompozitu se koriste vlakna izrađena od raznih materijala. Općenito za izradu ojačanja dolaze u obzir mnoge vrste materijala ako su kemijski kompatibilne matrici. Tako se u najopćenitijem smislu javljaju sljedeće grupe materijala za izradu ojačanja [7]:

- prirodna vlakna (pamuk, sisal, lan, itd.),
- staklena vlakna (E-staklo, S-staklo, R-staklo),
- poliesterska vlakna (Dacron, Terilen, itd.),
- aramidna vlakna (Kevlar, Twaron, itd.),
- ugljična vlakna (Carbon),
- metalna vlakna (žica ili žičano pletivo).

2.6.1. Staklena vlakna

Staklena vlakna su niti načinjene od određenog tipa stakla, koje se najčešće koriste kao ojačala u kompozitnim materijalima. Staklena vlakna se proizvode od rastaljene smjese silicija i minerala koji sadržavaju okside potrebne za formiranje određenog sastava smjese, koja se tali u velikim pećima. Zatim se staklo izvlači iz spremnika načinjenog od legure platine na kojem se nalazi nekoliko tisuća individualnih otvora, promjera od 0,8 do 3,175 mm. Dok su još u viskoznom stanju, vlakna se oblikuju do željenog promjera 3-20 μm . Ova vrsta vlakana je najčešće korištena u brodogradnji [8, 9].

Staklena vlakna se mogu podijeliti u dvije kategorije, jeftina vlakna za opću uporabu i premium vlakna za specijalnu upotrebu. Preko 90% proizvedenih staklenih vlakana su za opću uporabu [10]. U tablici 3. prikazani su tipovi stakla i njihova nazivna svojstva.

Tablica 3. Tipovi stakla i nazivna svojstva [8]

Oznaka	Nazivno svojstvo
E-staklo , electrical(električna)	Mala električna provodnost
S-staklo , strenght(čvrstoća)	Visoka čvrstoća
C-staklo , chemical(kemijska)	Visoka kemijska otpornost
M-staklo , modulus(modul)	Visoka krutost
A-staklo , alkali(lužina)	Visoko lužnato staklo
D-staklo , dielectric(dielektrična)	Mala dielektrična konstanta

Staklena vlakna se proizvode kao kratka (isjeckani roving) i dugačka vlakna (kontinuirani roving). Dugačka vlakna (slika 11) se upotrebljavaju kod postupaka sa štrcanjem vlakana, za tkanje (ručno i strojno nanošenje u otvorene kalupe). Kratka vlakna (sječena) se upotrebljavaju u duromerima i smjesama koje se prerađuju postupcima ubrizgavanja ili injekcijskog prešanja [9].



Slika 11. Strukovi staklenog vlakna [7]

Za postupke podtlačnog injekcijskog prešanja i pultrudiranja u otvorenim kalupima se upotrebljava mat. Mat je proizvod sječenog rovinga (dužine oko 5 cm), koji se sastoji od jednoliko debelog sloja vlakana površinski razbacanih u svim smjerovima (slika 12), koje na okupu drži posebno ljepilo (u obliku emulzije ili praha) topivo u matrici ili su okomito na površinu prošivena vlaknima od istog ili drugog materijala. Mat brzo impregnira (natapa se), dobre je prozirnosti i dobrih mehaničkih svojstava. U matu nisu dozvoljene šupljine (rupe) promjera preko 50 mm. Laminat izrađen s matom rezultira podjednakim svojstvima u svim smjerovima [9, 11].



Slika 12. Stakleni mat 400g/m² [7]

Svojstva kompozita sa staklenim vlaknima su [9]:

- povišena rastezna čvrstoća i modul rastezljivosti,
- povoljnog su omjera čvrstoće i mase,
- postojani su pri povišenim temperaturama i koroziji,
- dimenzijski su stabilni,
- imaju dobra električna svojstva,
- postojani su na starenje,
- relativno se jednostavno i jeftino prerađuju u gotove proizvode.

2.6.2. Jutena vlakna

Juta (*Corchorus capsularis*) je slična konoplji. Ima visoki sadržaj lignina u stabljici. Uzgaja se u Pakistanu, Bangladešu i na području Kaspijskog jezera. Upotrebljava se za izradu vreća, prostirki, a nekad se upotrebljavala i kao punilo za linoleum [12]. Danas se juta sve više koristi u autoindustriji i općenito u izradi biokompozita.



Slika 13. Snopovi jute [13]

Biljka jute u razdoblju dva ili tri mjeseca izraste od 1.8m do 2m u visinu i nema grana. Stabljika jute je prekrivena sa debelom korom, koja sadrži vlakna. Nakon što juta izraste, ista se sječe, veže u snopove i drži pod vodom nekoliko dana kako bi stabiljke počele

truliti i vlakna se počela odvajati od kore. Jutena vlakna imaju umjerno visoku specifičnu čvrstoću i krutost. Međutim, pokazuju znatnu razliku u promjeru duž svake pojedinačne niti.

Svojstva vlakana ovise o veličini, zrelosti i vrsti obrade izdvajanja vlakana, dok gustoća i vlačna čvrstoća ovise o unutarnjoj strukturi i kemijskom sastavu vlakna [13]. U tablici 4. prikazana su svojstva biljnih vlakana u odnosu na staklena vlakna.

Tablica 4. Pregled svojstva biljnih vlakana u odnosu na staklena vlakna [14]

Vlakno	Vrsta vlakna	Gustoća, g/cm ³	Prekidna čvrstoća, MPa	Modul rasteznosti, GPa	Specifična čvrstoća, MPa/(g/cm ³)	Prekidno istezanje, %	Apsorpcija vlage, %	Cijena po kg, USD
Stakleno vlakno	mineral	2,50 – 2,55	1 800 – 3 500	70,0 – 73,0	700 – 1 400	2,5 – 3,0	0,0	1,30
Lan	lika	1,40 – 1,50	345 – 1 500	27,6 – 80,0	230 – 1 070	1,2 – 3,2	7,0	1,50
Konoplja	lika	1,48	550 – 900	70,0	370 – 610	1,60	8,0	0,6 – 1,8
Juta	lika	1,30 – 1,45	400 – 800	10,0 – 30,0	280 – 610	1,16 – 1,8	12,0	0,35
Agava	list	1,33 – 1,45	468 – 700	9,4 – 38,0	320 – 530	2,0 – 7,0	11,0	0,6 – 0,7
Curaua	list	1,40	500 – 1 150	11,8	360 – 820	3,7 – 4,3	n/a	0,60

3. KOMPOZITI S OBZIROM NA MATERIJAL MATRICE

3.1. Kompoziti s metalnom matricom

Mada su polimeri dominantni kao materijali matrice, u velikoj se mjeri koriste još i metali (MMC – *e. Metal Matrix Composites*). Radi se o kompozitima kod kojih je matrica metalna (u pravilu duktilna). Kompoziti s metalnom matricom se odlikuju iznimno dobrim mehaničkim svojstvima. Ojačavanjem metalne matrice ojačalima u obliku čestica, kontinuiranih i diskontinuiranih vlakana, modificiraju se svojstva matrice i ono što je osobito značajno, povisuje se specifična čvrstoća i specifična krutost, te poboljšava otpornost puzanju. Značajna prednost je što ovi kompoziti omogućuju upotrebu pri znatno višim radnim temperaturama (višim od 700 °C), no uz vrlo visoku cijenu proizvodnje koja je uvjetovana iznimno kompliciranim postupcima izrade (u odnosu na polimerne kompozite), pa je njihova uporaba prilično ograničena [3, 15, 16].

Kao materijali matrice mogu se upotrijebiti razni metali poput superlegura na bazi nikla i kobalta, titanovih legura, te lakih magnezijjskih i aluminijskih legura posebno prikladnih u zrakoplovstvu [3].

Osnovni problem pri proizvodnji je kemijska (ne)kompatibilnost metalne matrice i vlakna zbog kemijskih reakcija među njima, što i sužava broj kombinacija vlakana i matrica koje je moguće kombinirati. Stoga su se za ojačavanje (u obliku kontinuiranih vlaknastih ojačala) metalnih matrica najbolje pokazali silicijev karbid (SiC), aluminijev oksid (Al₂O₃), aluminij (Al), bor (B), te Borsic (borovo vlakno presvučeno silicijevim karbidom). Upotreba ugljičnih vlakana je vrlo ograničena, obično na aluminijske i magnezijeve matrice, ako je izloženost visokim temperaturama minimalna [1, 15, 16].

Prerada kompozita s metalnom matricom u načelu se sastoji od najmanje dva koraka. Prvi korak predstavlja sjedinjenje (npr. ulaganje ojačala u matricu), a drugi je oblikovanje. U tu svrhu razvijene su mnoge metode od kojih su neke prilično sofisticirane, dok se npr. metalni kompoziti s diskontinuiranim vlaknima oblikuju uobičajenim postupcima kao što su kovanje, valjanje i ekstrudiranje [3].

Prednosti kompozita sa metalnom matricom su [5]:

- vrlo visoka čvrstoća i krutost uz vrlo nisku gustoću,
- visoka toplinska i električna vodljivost i niska toplinska rastezljivost,
- vrlo dobra otpornost na trošenje,
- vrlo dobra svojstva pri visokim temperaturama.

Nedostaci kompozita sa metalnom matricom su [5]:

- komplicirana proizvodnja,
- vrlo visoka cijena - cijena će padati sa širenjem primjene,
- nedovoljno podataka o svojstvima materijala,
- još uvijek nema dovoljno smjernica za konstruiranje s ovom vrstom materijala,
- loša recikličnost.

3.2. Kompoziti s keramičkom matricom

Ova vrsta kompozita sadrži keramičku matricu dodatno ojačanu česticama ili viskerima. Keramika je općenito poznata kao materijal otporan puzanju koji zadržava dobru mehaničku otpornost pri visokim temperaturama (stabilnost pri ekstremno visokim temperaturama), te koji je iznimno postojan prema koroziji. Svojstva su također i visoka tvrdoća, te mala masa. Osnovni im je nedostatak sklonost krhkom lomu, zbog izrazito niske lomne žilavosti u odnosu na metale, što se nastoji prevladati razvojem suvremenih keramičkih kompozita [3, 17].

Matrice se dijele u dvije osnovne skupine [17]:

- oksidna keramika; u ovu skupinu spadaju Al_2O_3 , SiO_2 , mulit ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$), Ba-, Li- i Ca-aluminosilikati (oksidna keramika ima nešto bolju toplinsku i kemijsku stabilnost),
- neoksidna keramika; u ovu skupinu spadaju SiC, Si_3N_4 , BC, AlN, itd. (neoksidna keramika ima nešto bolja mehanička svojstva).

Također postoje i dvije osnovne vrste ojačanja. Prva vrsta su tzv. diskontinuirana ojačanja. U ovu skupinu spadaju čestice, viskeri, sječeni komadići vlakana itd. Za ojačanje se upotrebljavaju čestice cirkonijeva oksida (ZrO_2) ili aluminijeva oksida (Al_2O_3), odnosno silicijev karbid (SiC) i silicijev nitrid (Si_3N_4) ako se radi o viskerima, itd. Smatra se kako ova ojačanja imaju nešto niža mehanička svojstva, no dobra im je strana što se kompoziti mogu

proizvoditi nekim od klasičnih postupaka proizvodnje monolitne keramike što znatno pojeftinjuje konačnu cijenu materijala. U novije vrijeme za ojačanje keramičke matrice koriste se kontinuirana vlakna. Ona imaju bolja mehanička svojstva, no dobivaju se složenijim proizvodnim postupcima što poskupljuje konačnu cijenu materijala. Vlakna se najčešće izrađuju od sljedećih materijala: Al_2O_3 , mulit ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$), ugljik, SiC (najčešće se primjenjuje zbog visoke čvrstoće, krutosti i toplinske stabilnosti) [3, 17].

Ugradnjom čestica ili viskera jednog keramičkog materijala u matricu od druge vrste keramike, lomna žilavost se može povećati i do 10 puta. To se postiže međudjelovanjem propagirajuće pukotine i ojačala pri čemu čestice ili viskeri sprečavaju napredovanje pukotine. Općenito je poznato nekoliko metoda za zaustavljanje ili usporavanje propagiranja pukotine. U slučaju keramičkih kompozita ojačanih česticama cirkonijeva oksida usporavanje je posljedica naprezanjem inducirane fazne transformacije čestica ZrO_2 u neposrednoj blizini pukotine što rezultira pojavom tlačnih naprezanja pri čemu se pukotina zatvara. Kod kompozita ojačanih keramičkim viskerima usporavanje se temelji na zaobljavanju vrha pukotine, premošćivanju pukotine, apsorbiranju energije tijekom razvlačenja pri čemu se viskeri odvajaju od matrice ili dolazi do preraspodjele naprezanja u rubnim područjima pukotine. Prednost viskerima ojačanih keramika u odnosu na neojačane keramičke materijale je i znatno manje rasipanje čvrstoće materijala. Osim toga, tako ojačani keramički kompoziti izuzetno su otporni na pojavu puzanja i toplinske šokove uzrokovane naglim promjenama temperature [3].

Kompoziti keramičke matrice proizvode se postupcima vrućeg prešanja (HP), vrućeg izostatičkog prešanja (HIP) i sinteriranja. Keramički kompoziti se primjenjuju za mehanički i tribološki opterećene dijelove izložene visokim radnim temperaturama ($> 1600\text{ }^\circ\text{C}$) kao što su primjerice pojedini dijelovi motora [3].

3.3. Kompoziti s polimernom matricom

Polimerni kompoziti su najraširenija vrsta kompozita. Zastupljeni su u raznim granama industrijske proizvodnje (automobilskoj industriji, brodogradnji, građevinarstvu, elektrotehnici i elektronicima, zrakoplovstvu, vojnoj industriji, te u svemirskim programima) gdje vrlo uspješno zamjenjuju klasične konstrukcijske materijale. Sastoje se od polimerne matrice i punila i/ili ojačavala. Polimerne matrice mogu biti napravljene na temelju

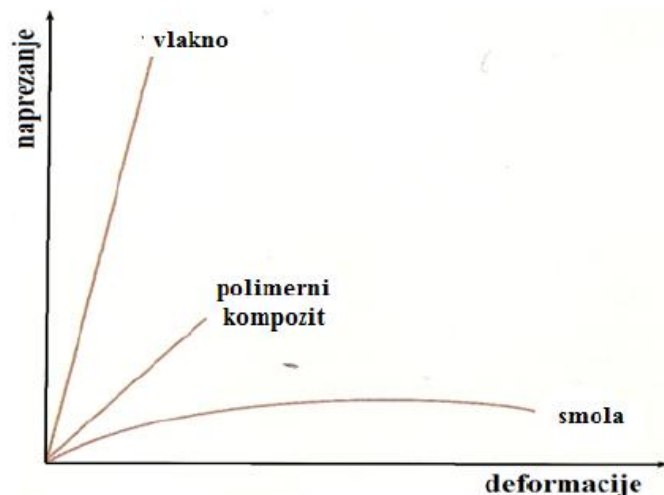
duromernih smola (npr. epoksidne, ili nezasićene smole), kaučukovih smjesa, te plastomera [18].

Ponašanje polimernog kompozita ovisi o svojstvima materijala i ojačavala, veličini i rasporedu konstituenata, volumnom udjelu konstituenata, obliku konstituenata, prirodi i jakosti veza među konstituentima. Kompoziti mogu istovremeno postići: visoku čvrstoću, visoku krutost i malu masu, postojanost na različite medije i druge kombinacije svojstava. Moguća je izrada složenih oblika od polimernih kompozita. Njihovom primjenom dolazi do sniženja troškova naknadne obrade dijelova. Također jedna od odlika polimernih kompozita je dimenzijska stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima [19].

3.3.1. Svojstva polimernih kompozita

Polimerni se kompoziti zbog svojih svojstava sve više primjenjuju u brodogradnji, zrakoplovstvu, građevinarstvu i automobilske industriji. Važna temeljna svojstva polimernih materijala su čvrstoća, žilavost, krutost, a nezaobilazna su i neka specifična svojstva kao npr. međuslojna čvrstoća i sadržaj šupljina [18].

Kako se polimerni kompoziti sastoje od smole ojačane vlaknima, svojstva polimernih kompozita ovise o svojstvima vlakna, svojstvima smole, volumnom omjeru vlakana naspram smole (VOV), te geometriji i orijentaciji vlakana u kompozitu. Na slici 14. je prikazano kako polimerni kompozit sadrži svojstva koja nema niti jedna njegova komponenta pojedinačno. Najvažnija karakteristika kompozitnih materijala je da se njihova svojstva mogu oblikovati prema željama i potrebama gotovog proizvoda (izdržljivost kompozita na tlak, vlak, smik i savijanje) [9].



Slika 14. Prikaz poboljšanih svojstava polimernih kompozita [9]

Prednosti kompozitnih polimernih materijala u odnosu na druge konstrukcijske materijale su: povoljne vrijednosti specifične čvrstoće i specifične krutosti, mala gustoća, dobra kemijska postojanost, dobro prigušenje vibracija, relativno laka i ne suviše skupa proizvodnja konstrukcijskih dijelova. Naravno postoje i nedostaci, a to su: krutost (nedeformabilnost), mogućnost raslojavanja i mrvljenja, anizotropnost svojstava, skupe komponente

Kemijski sastav polimerne matrice bitno određuje svojstva polimernih kompozita. U primjeni prevladavaju duromerne matrice, prvenstveno one poliesterskog i epoksidnog tipa. Različiti tipovi poliesterske matrice uz isto ojačavalo mogu pokazati različita svojstva. Za svojstva kompozita važna je ne samo vrsta ojačavala, nego i njegova usmjerenost i raspodjela u matrici.

Zbog heterogene strukture polimernih kompozita sposobnost povezivanja matrica i ojačavala bitno utječe na svojstva. Za homogenizaciju kompozita važna je kompatibilnost matrice i ojačavala, a često se koriste organske matrice s anorganskim ojačavalima (staklom). Kompoziti gotovo uvijek sadrže šupljine raznih oblika i veličina koje nastaju zbog neuklopljenih mjehurića zraka u viskoznoj fazi smole tijekom izrade, ili su posljedica lošeg kvašenja vlakna (npr. uslijed neodgovarajuće viskoznosti matrice) te šupljine smanjuju svojstva i bitno utječu na djelovanje medija [9].

4. MATRICE

4.1. Funkcije i svojstva matrice

Osnovne funkcije matrice su [20]:

- povezuje vlakna,
- prenosi opterećenje na vlakna,
- zaštićuje vlakna od okolnih utjecaja i oštećenja.

Također, treba reći da matrica ne smije kemijski reagirati s vlaknom i mora dobro prijanjati uz vlakna .

Svojstva matrice (tablica 5) izrazito su važna za određivanje uzdužne tlačne čvrstoće, poprečne vlačne čvrstoće, kao i međuslojne posmične čvrstoće i obično se kaže da su ova svojstva uvjetovana matricom. U zrakoplovnim konstrukcijama, matrica mora biti otporna i na pogonsko gorivo, hidrauličke fluide, kao i različite kemikalije koje se koriste pri održavanju (npr. sredstva za skidanje boje). Od kompozita se traži da dobro podnose temperature do 150 °C, iznimno i do 200 °C. Svojstva matrice najčešće određuju i svojstva kompozita, kao i ograničenja u primjeni. U slučaju izloženosti kompozita kemijskim ili utjecajima okoline, matrica je ona koja je prva izložena smanjenju mehaničkih svojstava, te njena svojstva značajno određuju ponašanje kompozita.

Vrlo je bitno fizikalno svojstvo temperatura prelaska u kruto stanje (engl. glass transition temperature - GTT) koja definira točku prelaska iz viskoznog u kruto stanje matrice. Ova temperatura bitno definira konačna svojstva matrice. Naime, pri upotrebi iznad GTT, svojstva matrice znatno se snižavaju. Vlaga u kompozitu (ponajviše matrici) znatno snižava GTT. Tehnologija izrade kompozita znatno utječe na njegova svojstva, jer mora osigurati dobru vezu vlakna i matrice, kao i minimalan udjel šupljina ili pukotina u kompozitu [16].

Tablica 5. Mehanička svojstva materijala matrice [16]

tip matrice	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	G [GPa]	σ_v [MPa]	ε [%]	α [10 ⁻⁶ /°C]	T_g [°C]
Poliester	1500	4.5	2	90	5	200	110
Vinil ester	1150	4	-	90	5	53	150
Epoksi	1400	6	2.2	130	8.5	70	250
Bizmaleimid	1320	3.6	1.8	78	6.6	49	300
Poliimid	1890	4.9	-	120	3	90	320
Polieter imid	1270	3	-	105	60	62	217
Poliamid imid	1400	5	-	95-185	12-18	36	240 - 270
PPS	1340	3.3	-	70-75	3	54-110	85
PEEK	1320	-	-	92-100	150	-	143
Polisulfon (PS)	1240	2.5	-	70-75	50-100	56-100	190
Polipropilen (PP)	900	1-1.4	-	25-38	300	110	-20 - -5
Polikarbonat (PC)	1200	2.4	-	45-70	50-100	70	133
Aluminij	2700	70	-	200	-	-	-
Ti-6Al-4V	4500	110	-	1000	-	-	-
borosilikatno staklo	2300	60	-	100	-	3.5	-
MgO	3600	210-300	-	97-130	-	13.8	-
Al ₂ O ₃	4000	360-400	-	250-300	-	8.5	-
SiC	3200	400-440	-	310	-	4.8	-

Kad je riječ o polimerima, oni se dijele u tri velike skupine: duromeri, elastomeri i plastomeri. Kao materijali matrice, najviše se koriste duromeri i plastomeri. Duromeri pri zagrijavanju stvaraju ireverzibilne kemijske veze među polimernim lancima koji su međusobno snažno umreženi. Pri ponovnom zagrijavanju, oni ne mijenjaju stanje, već ostaju kruti sve dok se pod djelovanjem visoke temperature potpuno ne razgrade. Ovo ukazuje i na velik problem pri njihovoj primjeni, nije ih moguće reciklirati mekšanjem matrice, već samo mehanički usitniti čime se dobivaju sitne granule koje u sebi sadrže i vlakna i matricu. Za razliku od njih, plastomeri imaju svojstvo da se pri hlađenju stvrdnjavaju, ali pri ponovom zagrijavanju mekšaju, te ih je moguće ponovno oblikovati. Ovo omogućuje popravljjanje dijelova koji su izrađeni od ovih kompozita, kao i njihovo djelomično recikliranje. Nadalje, kod plastomera je moguća određena kristaličnost, dok su duromeri isključivo amorfni. Kristaličnost je uzrokovana usmjerenošću lanaca. Oni dijelovi polimera (ili oni polimeri) koji su kristalični imaju veću gustoću, ali i bolja mehanička svojstva i otpornost utjecaju otapala (što je uzrokovana smanjenom molekularnom aktivnošću, odnosno većom uređenošću molekula).

Duromeri su polimeri koji se najčešće koriste u proizvodnji kompozita zbog relativno niske cijene, niskih proizvodnih temperatura, niske viskoznosti pri proizvodnji te dobrog oplakivanja vlakna. Od njih, za kompozite visokih mehaničkih svojstava, u zrakoplovnim konstrukcijama najčešće su korištene epoksidne smole zbog lakog korištenja, niske cijene, zbog svojih izvrsnih mehaničkih svojstava, dobre kemijske postojanosti, te zadržavanja

dobrih mehaničkih svojstava i dimenzija pri povišenoj temperaturi i vlazi. Nadalje, dobro reagiraju (ostvaruju dobru adheziju) s većinom vrsta vlakana. Budući da pri proizvodnji prolaze kroz period vrlo niske viskoznosti, to im omogućava vrlo široke tehnike proizvodnje.

Epoksidi su najčešće dvokompozitni, pri čemu se u procesu proizvodnje dodaje očvršćivač koji postaje sastavni dio strukture matrice. Nakon miješanja epoksida i očvršćivača, pod djelovanjem topline dolazi do skrutnjavanja, što se događa nekoliko sati. Konačna svojstva epoksidne matrice pokazuju izrazitu krhkost, što dovodi do znatne osjetljivosti obzirom na pojavu pukotina. Da bi se poboljšala ova svojstva, kao i otpornost na vlagu i toplinska stabilnost, danas se epoksidima dodaju elastomeri, kao i drugi tipovi polimera.

Druga vrsta duromera koja se sve više koristi zbog otpornosti povišenim temperaturama jesu adicijski poliimidi. Među njima su najpoznatiji bismaleimidi (BMI) koji posjeduju dobre proizvodne karakteristike, no glavni nedostatak im je povišena krhkost koja se može smanjiti dodavanjem odgovarajućih spojeva (npr. polisulfon, polieterimid i dr). Druge vrste ovih spojeva jesu PMR-15 poliimidi sa GTT od gotovo 300 °C. Cianati su također duromeri koji su pogodni za primjenu na visokim temperaturama koji imaju GTT oko 290 °C. Odlikuju ih dobre karakteristike pri primjeni u vrućim i vlažnim uvjetima (nešto slabija od epoksidne smole) te visoka tvrdoća. Vrlo su često korišteni i nezasićeni poliesteri, najčešće u kombinaciji sa staklenim vlaknima. Predstavci ovih polimera su vinil esteri koji su vrlo popularni zbog svoje cijene, otpornosti na vlagu, te brzine i jednostavnosti u izradi kompozita.

Plastomeri su najšire klasificirani kao amorfni i kristalični, mada svi ispoljavaju kristaličnost u većoj ili manjoj mjeri. Nadalje, kristalični elastomeri pokazuju znatno bolju otpornost utjecajima goriva, hidrauličkih fluida i dr. u odnosu na amorfne. Amorfni plastomeri pokazuju veliku isprepletenost polimernih lanaca, a pri zagrijavanju te se veze raskidaju i polimer se ponaša kao viskozni fluid. Amorfni plastomeri su i u određenoj mjeri osjetljivi na otapala, te su znatno osjetljiviji na puzanje i zamorna oštećenja nego kristalični. Plastomeri su znatno manje skloni upijanju vlage i manje su osjetljivi na udarna oštećenja. Mogu se u ograničenoj mjeri popravljati ponovnim zagrijavanjem i zavarivati. No temperature i pritisci na kojima polimeriziraju su znatno viši u odnosu na duromere.

Kristalični plastomeri svojstvo kristaličnosti posjeduju zbog veće ili manje usmjerenosti polimernih lanaca, mada kompletnu kristaličnost nije moguće postići. Pri zagrijavanju, kristalične se faze miješaju i matrica postaje amorfni, viskozni fluid. Ovi su

polimerni u stvari semikristalični budući sadrže i kristaličnu i amorfnu fazu. Proizvodni uvjeti bitno utječu na stupanj kristaličnosti - što je veća brzina hlađenja kristaličnost je manja.

Poliketoni su grupa kristaličnih plastomera koji imaju izvrsnu toplinsku otpornost. Među njima se ističu polieterketon (PEK), polieterketonketon (PEKK) te najčešće korišteni polietereeterketon (PEEK). PEEK ima stupanj kristaličnosti do 40%, dobra mehanička svojstva, te otpornost prema otapalima i kiselinama s izuzetkom koncentrirane sumporne kiseline. Osnovni je nedostatak vrlo visoka cijena proizvodnje. Plastomeri mogu biti proizvedeni znatno brže, jer povišenu temperaturu nije potrebno održavati dulje vrijeme. Neki od njih imaju znatno višu GTT, te temperaturu primjene od epoksida ili bizmaleimida. Nadalje, kod plastomera je uočljivo tečenje i znatna deformacija pri lomu, te time i znatno veća žilavost. No, oni ispoljavaju i puzanje pri povišenim temperaturama i konstantnim opterećenjem [16].

4.2. Materijali matrice

4.2.1. Epoksidne smole

Epoksidne smole spadaju u skupinu amorfni polimera koje karakterizira pojava gumene (gel) faze na višim, te staklaste faze na nižim temperaturama. Epoksidi koji polimeriziraju na sobnoj temperaturi pogodni su za korištenje na temperaturama do 50 °C, dok se ovisno o tipu otvrđivača ostale vrste epoksida obrađuju na temperaturama između 120 i 180 °C. Kemijske reakcije koje se pri polimerizaciji događaju jesu egzotermne, te upotreba velike količine otvrđivača (katalizatora) ili previsoka temperature polimerizacije može dovesti do toplinske degradacije matrice, a time i samog kompozita. Ovo je razlog zbog kojeg se posebna pažnja mora posvetiti izradi kalupa, posebice ako se radi o debljim ili većim dijelovima. Da bi im se promijenila mehanička svojstva, epoksidima se mogu dodavati različite tvari u svrhu smanjenja viskoznosti prilikom obrade, povećanja lomnog produljenja uz smanjenje modula elastičnosti, poboljšanje otpornosti širenju pukotina, promjena gustoće i dr. Njihov je osnovni nedostatak inherentna krhkost popraćena velikom čvrstoćom, što se često poboljšava dodavanjem plastomera.

Glavne prednosti epoksida su: mogućnost modificiranja svojstava prema postavljenim zahtjevima, mogućnost kontrole žilavosti, te laka i sigurna proizvodnost zbog male količine štetnih tvari koje se pri tome oslobađaju, malo skupljanje, dobra kemijska otpornost, te dobra

dimenzijska i toplinska stabilnost. Glavni nedostaci su: viša cijena proizvodnje u odnosu na npr. poliestere (posebice specijalne vrste epoksida koje se koriste u zrakoplovstvu), osjetljivost na vlagu, sporo polimeriziranje, mala otpornost nekim organskim spojevima (npr. organskim kiselinama i fenolima) te relativno niska najviša temperatura primjene [16]. Tablicom 6. prikazna su svojstva kompozita s matricom od epoksidne smole.

Tablica 6. Svojstva kompozita s matricom od epoksidne smole [20]

	Gustoća a kg/m ³	Tlačna čvrstoća a MPa	Modul elast. GPa	Smična čvrstoća, MPa	Smični modul Gpa	Vlačna čvrstoća a Mpa	Vol. udio vlakana %
Ugljična vlakna/epoksidna smola	1 600	570	70	90	5	600	50
E-staklena vlakna/epoksidna smola	1 900	415	-	-	-	490	50-60

4.2.2. Poliesterske smole

Poliesterske smole također pripadaju duromerima, a proizvode se egzotermnim kemijskim reakcijama pri kojima se nezasićeni poliesteri miješaju s relativno malom količinom inicijalizatora (katalizatora). Kao kod epoksida, i ovdje materijal pri polimerizaciji prolazi iz tekuće, preko gel do krute faze. Glavne prednosti ovih materijala su: mala početna viskoznost, mala cijena početnih sirovina, jednostavna proizvodnja, te izvrsna otpornost atmosferskim utjecajima. S druge strane, polimerizacija je vrlo egzotermna s visokim skupljanjem čime se u procesu proizvodnje unose značajna zaostala naprezanja, krhkost te slaba kemijska otpornost nekim spojevima (alkalima) [16]. Tablicom 7. prikazana su svojstva kompozita s matricom od poliesterske smole.

Tablica 7. Svojstva kompozita s matricom od poliesterske smole [20]

Materijal	Udio stakl. vlakana %	Tlačna čvrstoća MPa	Tlačni modul, 10⁻³ Pa	Svojna čvrstoća, MPa	Svojni modul, 10⁻³ Pa	Tlačna čvrstoća, MPa
Ortoftalna smola	40	150	5,5	220	6,9
Izofталna smola	40	190	11,7	240	7,6	210

4.2.3. Vinil esteri

Vinil esteri su po svojstvima između epoksida i poliestera. Polimerizacija se događa na relativno niskim temperaturama (kao kod poliestera), a konačna svojstva daju dobru kemijsku otpornost kao kod epoksida uz jednostavnu proizvodnju te bolja mehanička svojstva i bolje veze između vlakna i matrice u odnosu na poliestere. Ovi materijali imaju znatno veće troškove proizvodnje nego poliesteri te znatno veće skupljanje u odnosu na epoksidge. Tablicom 8. prikazana su svojstva kompozita s matricom od vinilesterske smole [16].

Tablica 8. Svojstva kompozita s matricom od vinilesterske smole [20]

	Gustoća , kg/m ³	Tlačna čvrstoća , MPa	Savojni modul, GPa	Savojna čvrstoća , MPa	Vlačni modul, GPa	Vlačna čvrstoća , MPa	Volumni udio vlakana, %
Ugljična vlakna/ vinil ester	1 500- 1 650	900- 1100	65-85	800- 1000	136	900- 1200	55-60
Poliara midna vlakna/ vinil ester	1 200- 1 400	100-300	17-22	150-250	-	800- 1000	50-60

4.2.4. Fenolne smole

Fenolne smole nastaju polimerizacijom fenola uz pomoć npr. formaldehida pod posebnim uvjetima. Ovi polimeri iskazuju dobru otpornost visokim temperaturama kao i otpornost gorenju, koja je posljedica ablativnih svojstava ovih smola (pri gorenju izgaraju slojevi materijala određenom brzinom stvarajući sloj ugljika) što im i jest najveća prednost pri upotrebi. Nedostaci su visoki tlakovi pri proizvodnji potrebni za polimerizaciju, kao i velik postotak šupljina što znatno snižava mehanička svojstva [16].

4.2.5. Bizmaleimidi

Bizmaleimidi (BMI) su visoko umreženi polimeri, po proizvodnji vrlo slični epoksidima, iako mogu imati nižu viskoznost i bolje oplakivanje vlakana. GTT im je između 180-320 °C, dok je maksimalna temperatura pri kojoj se mogu koristiti do 150 °C. Ovi su materijali izvorno krhki, što se poboljšava pomoću aditiva. U odnosu na epoksidge, prednost im je znatno bolja toplinska stabilnost, što je važno u zrakoplovnoj primjeni kod borbenih aviona visokih performansi koji lete velikim brzinama i na velikoj visini. Bizmaleimidi koji se koriste kod ovih konstrukcija imaju GTT oko 180 °C, mada se ne preporuča njihovo korištenje na temperaturama iznad 125 °C, posebice u uvjetima povećane vlage. Osnovni nedostatak su znatno viši troškovi proizvodnje u odnosu na epoksidge. Danas BMI kompoziti u zrakoplovnim konstrukcijama sve češće zamjenjuju kompozite s ugljičnom matricom [16].

4.2.6. Poliimidne smole

Poliimidne smole imaju prednost vrlo visoke temperature primjene koju nema niti jedna druga vrsta polimera, budući da im je GTT između 200-400 °C. Nadalje, ovisno o tehnologiji proizvodnje, mogu biti i duromeri (adicijski poliimidi), kao i plastomeri (kondenzacijski poliimidi). Procesi proizvodnje su često vrlo kompleksni jer uključuju visoke temperature i tlakove, te zahtijevaju strogo praćenje parametara procesa kako ne bi došlo do stvaranja eksplozivnih tvari. Tehnologija proizvodnje uključuje korištenje preprega ili ubrizgavanja smole u kalup. U zrakoplovnim konstrukcijama koriste se za kućišta mlaznih motora ili za konstruktivne elemente lovačkih aviona visokih performansi. Najkvalitetniji od ovih polimera imaju GTT veću od 270 °C, procesnu temperaturu od preko 370 °C, dugotrajnu toplinsku stabilnost i izvrsna mehanička svojstva. Osnovna prednost im je stabilnost i odlična mehanička svojstva na visokim temperaturama, visoka kvaliteta proizvedenih komponenti te otpornost većini kemikalija, dok je nedostatak cijena i složenost proizvodnje [16].

4.2.7. Cianatne smole

Cianatne smole polimeriziraju pomoću katalizatora relativno brzo pri temperaturama 170-250 °C i s vrlo malim skupljanjem. Nakon polimerizacije, karakteristike su dobra čvrstoća i tvrdoća na povišenim temperaturama, vrlo malo upijanje vlage (iako dugotrajna izloženost vlazi uzrokuje smanjenje svojstava) što predstavlja problem za korištenje u zrakoplovnim konstrukcijama. Ovi materijali se mogu miješati s epoksidima ili drugim duromerima kako bi se dobila poboljšana svojstva [16].

4.2.8. Polifenilen sulfid

Polifenilen sulfid (PPS) je visoko kristalični polimer (stupanj kristaličnosti do 60%) s odličnom toplinskom stabilnošću, te kemijskom i vatro otpornošću što ga čini atraktivnim materijalom (i dopuštenim, prema FAA) za avionske interijere. Materijal zadržava dobra svojstva i na temperaturama do 200 °C kada počinje postupno smanjivanje mehaničkih svojstava [16].

4.2.9. Polieterimid

Polieterimid (PED) je amorfan elastomer visokih mehaničkih svojstava. Dimenziono je stabilan (zbog amorfne strukture), ima izraženo malo skupljanje te visoko izraženu izotropiju u usporedbi s većinom kristaličnih polimera. Visoka GTT omogućava korištenje na temperaturama do 200 °C. Kemijski je vrlo otporan na velik broj kemikalija te na atmosferske utjecaje. Primjenu mu ograničava vrlo velika viskoznost u rastopljenom stanju [16].

5. POSTUPCI PROIZVODNJE POLIMERNIH KOMPOZITA

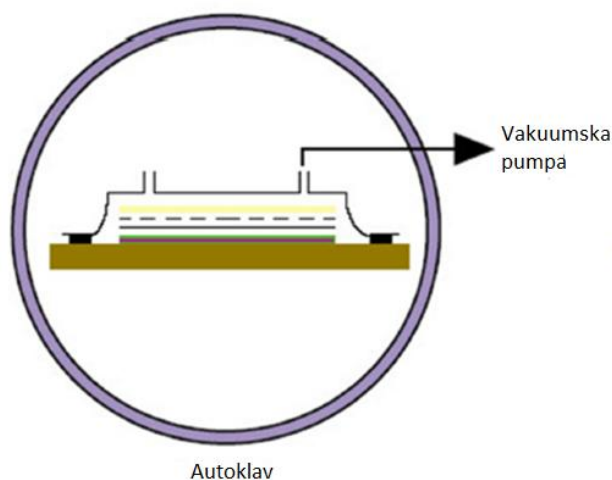
5.1. Uvodno o postupcima proizvodnje polimernih kompozita

Kako bi se postigla optimalana svojstva, vlakna trebaju u matricu biti uložena na odgovarajući način (raspored, razmak). Diskontinuirana vlakna mogu se miješati s materijalom matrice kako bi se postiglo slučajno ili preferirano orijentiranje. Kontinuirana vlakna uobičajeno se raspoređuju jednosmjerno (npr. trake), ortogonalno (npr. tkanine) i namotavanje [1].

5.2. Preprezi

Preprezi se proizvode od tkanine tako da se polimernom matricom natopi svaki sloj tkanine. Tako dobiveni oblici se najčešće zamrzavaju kako bi se mogli skladištiti dulje vrijeme. Natapanje treba provesti tako da se matrica ne polimerizira. Nakon toga se preprezi strojno polažu u kalup, vakuumski se pakiraju i zagrijavaju pri 120-180 °C. Ako je za postizanje boljih svojstava kompozita potreban nešto viši tlak (do 5 bara) sve se to stavlja u autoklav. Polimerne matrice mogu bit epoksidne smole, poliesteri, fenoli i visokotemperaturni palastomeri kao što su npr. poliimidi. Slika 15. prikazuje postupak izrade kompozita u autoklavu [1, 20].

Autoklav je posebna komora pod tlakom u kojoj se vrši dovršetak postupka izrade (umreživanje, stvaranje) kompozitne konstrukcije (dijela konstrukcije). U autoklav pećima se nalaze dušik, ugljični dioksid ili njihova mješavina sa zrakom pod tlakom. Autoklavi su grijani s pomoću plinskih plamenika ili električnih grijala do maksimalne temperature 700 °C. Računalnim upravljanjem parametara autoklava mogu se postići odgovarajući ciklusi umreživanja [21].



Slika 15. Postupak izrade kompozita u autoklavu [20]

Prednosti [20]:

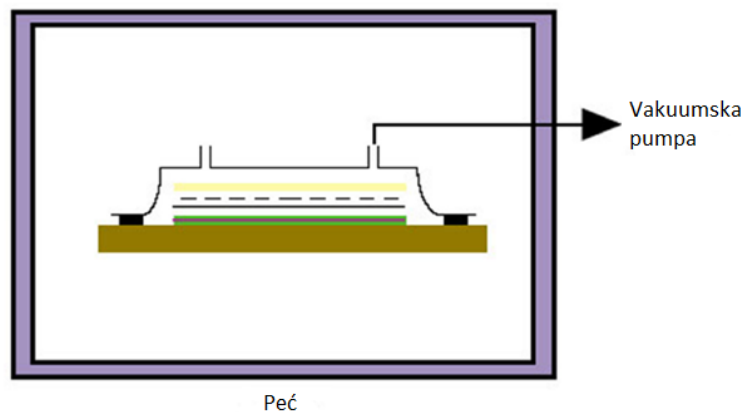
- moguće je vrlo precizno podešavanje udjela vlakana i smole,
- materijali su potpuno ekološki prihvatljivi,
- moguće je impregniranje i smola visoke viskoznost čime se značajno utječe na mehanička i toplinska svojstva kompozita,
- moguća je automatizacija cijelog procesa.

Nedostaci [20]:

- troškovi materijala su veći,
- materijal se skrućuje u autoklavu koji su prilično skupi i ograničenih su dimenzija,
- proces se odvija na povišenim temperaturama tako da i to treba uzeti u obzir prilikom izbora materijala alata.

5.2.1. Skrućivanje preprega pri nižim temperaturama

Za skrućivanje preprega rabe se kemijski dodaci koji omogućuju umrežavanje pri nešto nižim temperaturama 60-100 °C. Moguća je primjena samo vakuumske pakiranja bez autoklava. Matrica su uglavnom epoksidne smole, dok kao ojačanje mogu poslužiti sve vrste preprega. Na slici 16. prikazan je postupak skrućivanja preprega pri nižim temperaturama [20].



Slika 16. Postupak skrućivanja preprega pri nižim temperaturama [20]

Prednosti [20] :

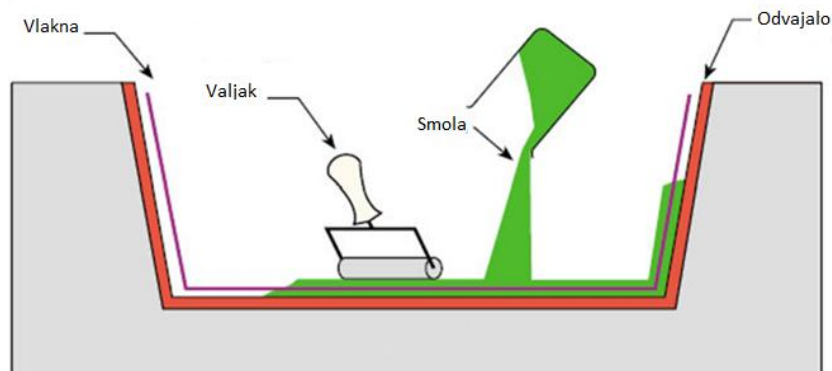
- mogu se koristiti jeftiniji materijali za izradu alata (npr. drvo) budući da su temperature skrućivanja nešto niže,
- zbog relativno jednostavne opreme moguća je izrada dijelova većih dimenzija,
- manji utrošak energije.

Nedostaci [20]:

- veća cijena materijala,
- ipak je potrebna oprema (peć i vakuumsko pakiranje),
- alat mora izdržati temperature od 60-100 °C.

5.3. Ručno polaganje

Vlakna povezana u tkanja različitog oblika stavljaju se u kalup. Na njih se nanosi smola koja se impregnira u ojačanja pomoću valjaka ili kistova. Do umrežavanja (skrućivanja) dolazi pri atmosferskim uvjetima. Matrice mogu biti različiti materijali: poliesteri, vinil esteri, epoksidne smole, fenoli itd. Svi tipovi vlakana se koriste (problemi se jedino mogu javiti u slučaju težih aramidnih vlakana koje je teže natopiti ručno). Na slici 17. prikazan je postupak ručnog polaganja [20].



Slika 17. Postupak ručnog polaganja [20]

Prednosti [20]:

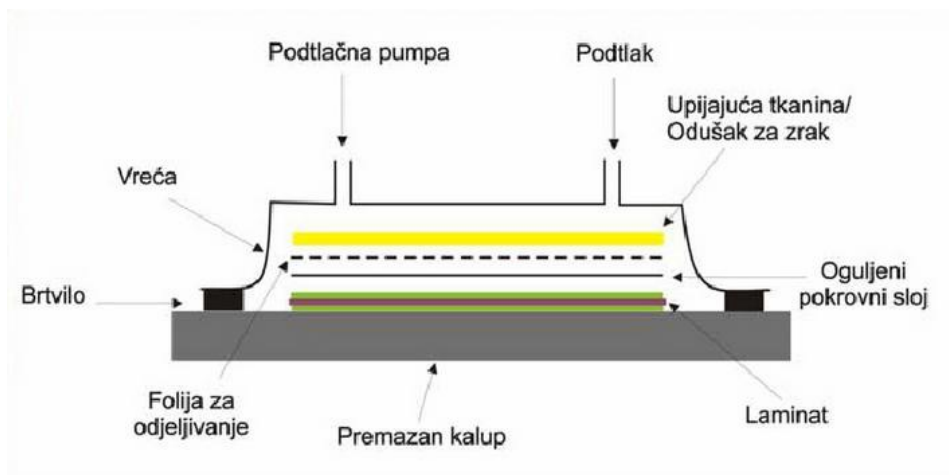
- vrlo jednostavan postupak koji se primjenjuje već dulje vrijeme,
- malen trošak izrade alata,
- veliki izbor vrsta materijala i dobavljača,
- udio vlakana je veći i vlakna su dulja nego u slučaju polaganja naštrecavanjem.

Nedostaci [20]:

- kvaliteta postupka u velikoj mjeri ovisi o vještini radnika,
- teško je proizvesti kompozite s malim udjelom smole bez pukotina,
- smole obično imaju manju molekularnu masu, što znači da mogu biti štetnije od proizvoda s većom molekularnom masom,
- problem je uklanjanje stirena nastalog iz poliestera i vinil estera, moraju se koristiti smole male viskoznosti što znatno utječe na svojstva.

5.4. Podtlačno oblikovanje

Ručno se slože sve komponente kompozita nakon čega se na njega stavlja polimerni pokrov. Pomoću vakuumske pumpe se uklanja zrak i podtlak kojim se poboljšava spajanje elemenata kompozita. Materijali matrice su fenolne i epoksidne smole, zato što kod poliestera i vinil estera problem može predstavljati povećana ekstrakcija stirena. Mogu se koristiti sve vrste vlakana [20]. Na slici 18. prikazan je postupak podtlačnog oblikovanja.



Slika 18. Postupak podtlačnog oblikovanja [22]

Prednosti [20]:

- proizvodnja kompozita s većim udjelom vlakana,
- manje pukotina u materijalu,
- bolje je vlaženje vlakana i protok smole kroz ojačanja zbog djelovanja povišenog tlaka,
- vakuumski pokrov smanjuje količinu ishlapljenih štetnih tvari tijekom skrućivanja.

Nedostatak [20]:

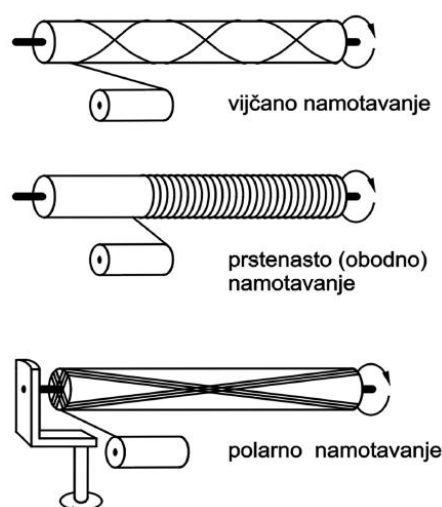
- proces je nešto skuplji i zahtjeva prilično veliku vještinu operatera (vrlo bitno kod kontrole miješanja i udjela smole).

5.5. Namatanje vlakana

Namatanje vlakana je postupak pri kojem se kontinuirana vlakna koja služe kao ojačalo namotavaju na model (obično cilindrični) tako da oblikuju šuplji dio. Vlakna, bilo u obliku individualnih snopova ili kao uža, najprije se namaču u kupki koja sadrži smolu, a zatim se kontinuirano namotavaju na cilindrični model, često primjenom automatizirane opreme za namotavanje [1, 3].

Ovisno o tome prolaze li vlakna kroz smolu prije namatanja ili se upotrebljavaju vlakna preprega, razlikuje se mokro i suho namotavanje. Rjeđe se koristi postupak naknadnog impregniranja kod kojeg se najprije vrši namatanje vlakana na jezgru i zatim se impregnira smolom [21].

Postoji više tipova namatanja: vijčano, prstenasto (obodno), paralelno (s osi jezgre) i polarno, o čemu ovise i mehanička svojstva, slika 19. Najčešće se primjenjuje polarno i vijčano namatanje. Nakon nanošenja niza slojeva slijedi očvršćivanje u peći ili pri sobnoj temperaturi, nakon čega se model odstranjuje. Kao alternativa mogu se namatati tanki preprezi. Namatanjem se postiže vrlo visoki omjer čvrstoće i gustoće, te visoki stupanj orijentiranosti vlakna. Uobičajene namotavane konstrukcije su oplata (kućišta) raketnih motora, spremnici i dr [1, 21]. Na slici 20. su prikazane cijevi polimernog kompozitnog materijala proizvedene namatanjem.



Slika 19. Prikaz vijčanog, prstenastog (obodnog) i polarnog namotavanja [20]

Prednosti [20]:

- vrlo brza i ekonomična metoda,
- može se regulirati udio smole na vlaknima,
- troškovi su manji zbog toga što se rabe pojedinačna vlakna, a ne tkanja,
- mogu se dobiti odlična mehanička svojstva kompozita ako se vlakna poslažu u smjeru djelovanja opterećenja.

Nedostaci [20]:

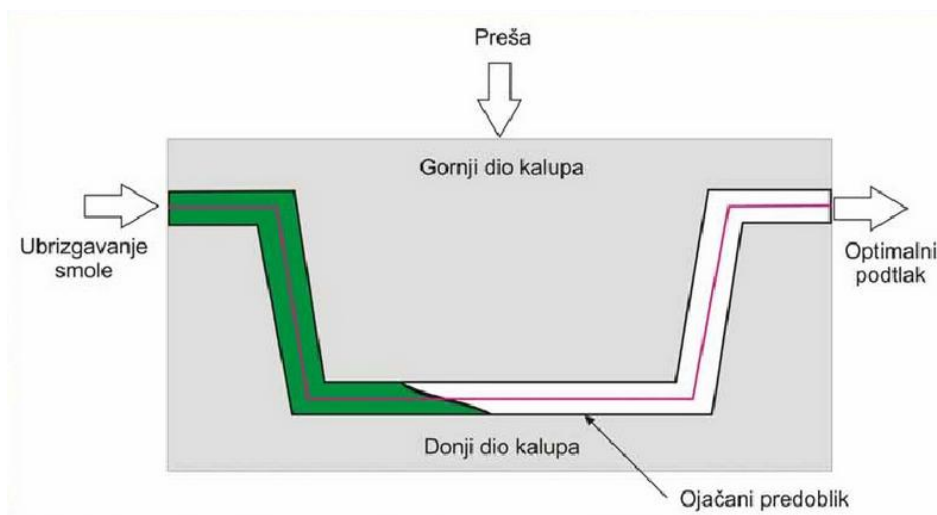
- oblici proizvoda koji se dobivaju su ograničeni,
- smještaj vlakana na različite oblike nije uvijek lagan,
- troškovi dijela na koju se namotava mogu biti visoki u slučaju izrade velikih dijelova,
- vanjska površina proizvoda nije uvijek estetski prihvatljiva.



Slika 20. Cijevi od polimernog kompozita proizvedene namatanjem [20]

5.6. Ubrizgavanje smole u kalup

Predoblik od vlakana se postavlja u kalup (mogu se stvoriti različiti oblici koji se drže vezivom). Kalup se zatvara te se u njega ubrizgava smola (može se koristiti i vakuum). Nakon što je kalup popunjen zatvaraju se mjesta na kojima je ubrizgana smola uslijed čega dolazi do skrućivanja (umrežavanja) pri povišenim ili sobnim temperaturama. Mogu se koristiti gotovo sve vrste matrica i vlakana. Na slici 21. je prikazan postupak ubrizgavanja smole u kalup [20].



Slika 21. Postupak ubrizgavanja smole u kalup [22]

Prednosti [20]:

- proizvodnja kompozita s visokim udjelom vlakana i s niskim udjelom pukotina u materijalu,
- budući da je smola zatvorena u kalup, ne predstavlja opasnost za okoliš,
- puno bolji izgled površine.

Nedostaci [20]:

- vrlo skup i težak alat,
- proizvodnja je ograničena na manje komade,
- mogu se pojaviti mjesta na proizvodu koja nisu popunjena smolom, što može dovesti do velikog škarta.

5.7. Infuzija sloja smole

U kalup se postavljaju suha ojačanja između kojih se postavljaju slojevi smole koja je u polukrutom stanju. Smola se nalazi na specijalnom papiru. Pomoću vakuum pumpe se izvlači zrak, nakon čega slijedi zagrijavanje čime se smola dovodi u tekuće stanje, te ispunjava prostor između ojačanja. Koriste se sve vrste vlaknastih ojačanja i epoksidnih smola. Na slici 22. prikazan je postupak infuzije sloja smole [20].



Slika 22. Postupak infuzije sloja smole [22]

Prednosti [20]:

- proizvodnja ekološki prihvatljivih kompozita s velikim udjelom vlakana,
- dobra mehanička svojstva koja se pripisuju krutom inicijalnom stanju polimera,
- manji troškovi nego u slučaju preprega,
- manja je mogućnost pojave područja koja nisu ispunjena smolom.

Nedostaci [20]:

- primjenjuje se jedino u zrakoplovnoj industriji,
- potrebna je peć i vakuumsko pakiranje,
- alat mora izdržati temperature od 60-100 °C.

6. BIOKOMPOZITI

6.1. Prednosti i nedostaci biokompozita

Biokompoziti su kompozitni materijali načinjeni od prirodnih vlakana (biljnog ili životinjskog podrijetla) i biološki nerazgradivih polimera nastalih derivacijama nafte (duromera: epoksidna smola, fenolna smola i plastomera: PE, PP, PVC, PS), sintetičkih (umjetnih) vlakana i biopolimera (nastalih preradom biljaka), od prirodnih vlakana i biopolimera koji su ujedno najekološkiji kompoziti i često se nazivaju zeleni kompoziti.

Prirodna vlakna mogu biti biljnog podrijetla (lišće, voće, liko, vlakna drva, trave, slame itd.) i životinjskog podrijetla (vuna, dlaka, svila). Na slici 23. prikazane su neke vrste prirodnih vlakana [20].



Slika 23. Vrste prirodnih vlakana [20]

Prednosti [20]:

- obnovljivi izvori,
- laka dostupnost,
- niska cijena i mali udio utroška energije tijekom proizvodnje,
- mala gustoća (spec. težina) osigurava visoku spec. čvrstoću i krutost u usporedbi s staklenim vlaknima,
- sigurnije za rukovanje i proizvodnju u odnosu prema sintetičkim vlaknima,
- uštede zbog manjeg trošenja opreme jer su prirodna vlakna neabrazivna u odnosu prema sintetičkim vlaknima,
- visoka električna nevodljivost,
- dobra zvučna izolacija,
- ne nastaje CO₂ (biljke stvaraju jedino ugljične spojeve prilikom izgaranja ili kompostiranja).

Nedostaci [20]:

- teško raspršljivi u matrici,
- prirodna vlakna su higroskopna-upijaju vlagu, što ima za posljedicu stvaranje pora, slabljenje veza, a time i lošijih mehaničkih svojstava kompozita,
- vlakna se počinju degradirati u rasponu od 90 do 200 °C, pa su temperatura obrade i izbor materijala matrice ograničeni,
- osjetljiva su na truljenje / degradacije iz okruženja (mikroorganizmi, gljivice, itd.),
- dimenzije vlakana i mehanička svojstva variraju od biljke do biljke,
- sadnja biljaka za izradu ojačala smanjuje zemljišta za sadnju prehrambenih sorti.

6.2. Postupci proizvodnje biokompozita

Zbog sličnih ili istih oblika ojačala, ali i matrica, postupci izrade biokompozita se poklapaju s postupcima izrade kompozita sa polimernom matricom (PMC), kao što su: oblikovanje naštrecavanjem, ručno polaganje (automatsko laminiranje), pultrudiranje (40-70 % ojačala), ubrizgavanje smole u kalup, namatanje, prepreg [20]. Na slici 24. prikazani su proizvodi od biokompozita.



Lan-ugljična vlakna hibridni
kompozitni bicikl - Prepreg postupak



Juta-PP kovčeg-aktovka
Postupak vakuumsko spajanje



Miješana prirodna vlakna i PP
Postupak ubrizgavanja smole u kalup



Miješana prirodna vlakna i PP
Postupak oblikovanja naštrcavanjem

Slika 24. Primjena biokompozita [20]

7. POSTAVKA ZADATKA

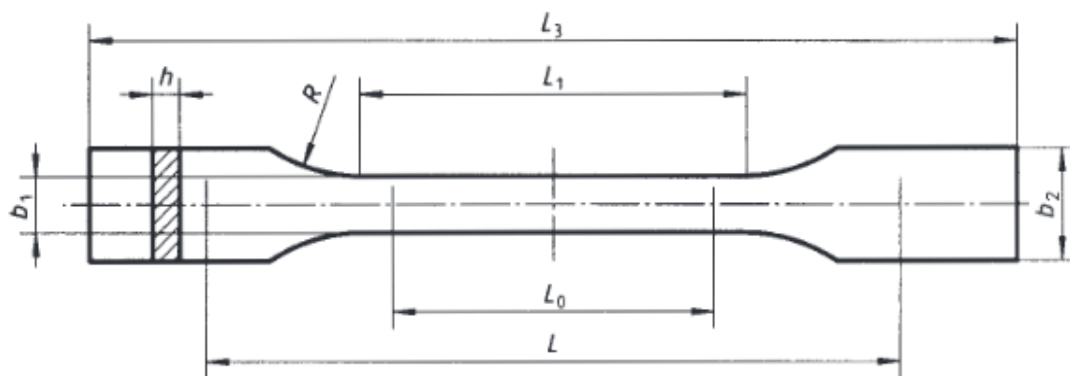
U eksperimentalnom dijelu rada provedena je izrada kompozita s epoksidom smolom kao matricom, te staklenim i jutenim vlaknima kao ojačalom. Na izrađenim uzorcima (epruvetama) provest će se ispitivanje vlačne čvrstoće. Ovim se ispitivanjem htjelo pokazati kakvih su svojstava ispitni uzorci koji su ojačani prirodnim vlaknima i njihova usporedba s uzorcima ojačanima staklenim vlaknima. Kompoziti koji su ojačani prirodnim vlaknima se u današnje vrijeme upotrebljavaju zato što su jeftiniji, manje zagađuju okoliš, lakše se razgrađuju i recikliraju, ne ovise o oskudnim resursima, potrebno je puno manje energije za njihovu proizvodnju, a osim toga praktični su u usporedbi s ostalim materijalima.

8. EKSPERIMENTALNI DIO

8.1. Izrada uzoraka

Postupak izrade uzoraka izveden je ručnim polaganjem pomoću kista. Za matricu kompozita koristila se dvokomponentna epoksidna smola, a kao ojačala staklena vlakna (roving 300 g/m²) i jutena vlakna (jutena vreća). Postupak se sastojao od nekoliko koraka.

Prvi korak je bio određivanje broja slojeva vlakana kako bi uz što manje dodatne mehaničke obrade postigli dimenzije ispitnih uzoraka zadane normom ISO 527-4 (slika 25) za vlaknima ojačane termo-plastične materijale, to smo odredili pomoću probnih uzoraka koji su bili izrađeni na isti način kao i ispitni uzorci. Epruvete su pravokutnog presjeka.



Slika 25. Dimenzije epruvete zadane normom ISO 527-4

Dimenzije epruvete:

h – debljina epruvete 5 mm,

b_1 – širina vrata epruvete $10 \pm 0,2$ mm,

b_2 – širina glave epruvete $20 \pm 0,2$ mm,

R – radijus 60 mm,

L_0 – početna mjerna duljina epruvete, mm $50 \pm 0,5$ mm,

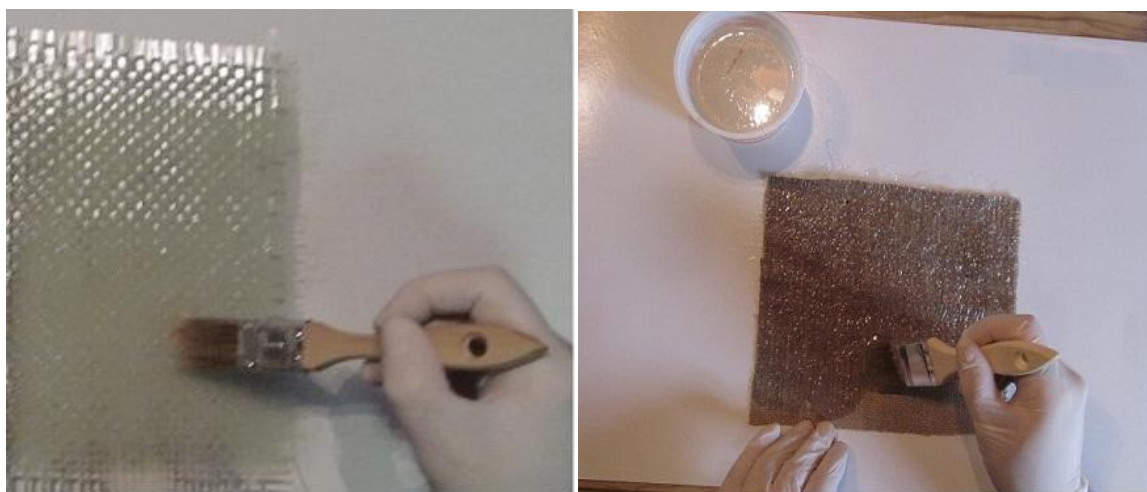
L_1 – ispitna duljina epruvete $60 \pm 0,5$ mm,

L – razmak između pakni 115 ± 1 mm,

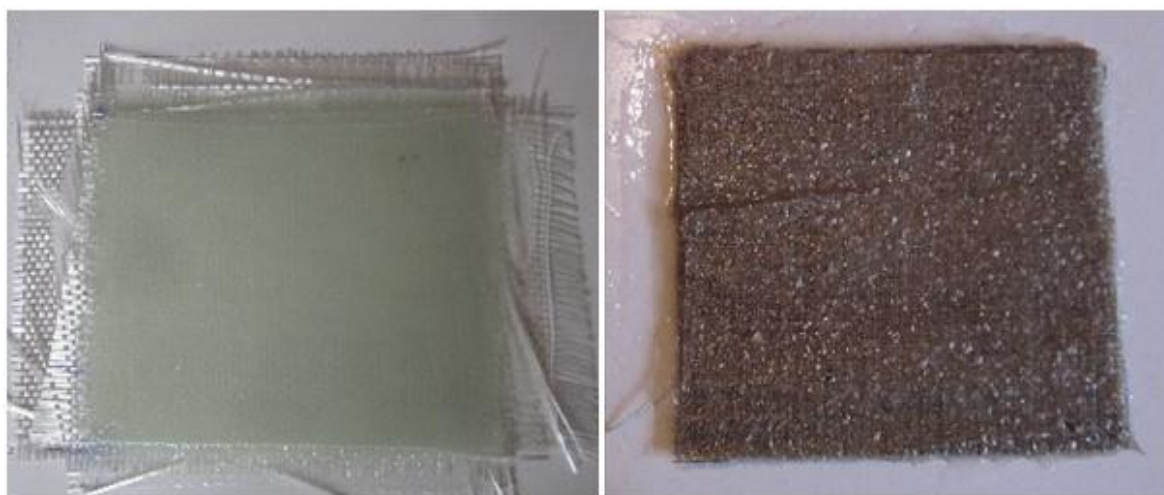
L_3 – ukupna duljina epruvete 150 mm.

Drugi korak se sastojao od izrezivanja staklenih i jutenih vlakana i pripreme epoksidne smole. Kada se smola dovoljno promiješala slijedilo je izrađivanje kompozitnih ploča (slika 26 i 27).

Prvi sloj vlakana dobro je natopljen smolom s obje strane, zatim se stavio sloj vlakna koji se opet natopio smolom, te se takav postupak ponavljao dok se nisu stavili svi slojevi. U slučaju kompozita s staklenim vlaknima stavljeno je dvanaest, a kod kompozita sa jutenim vlaknima pet slojeva ojačala. Kompozitne ploče ostavljaju se dva dana da se suše na sobnoj temperaturi.

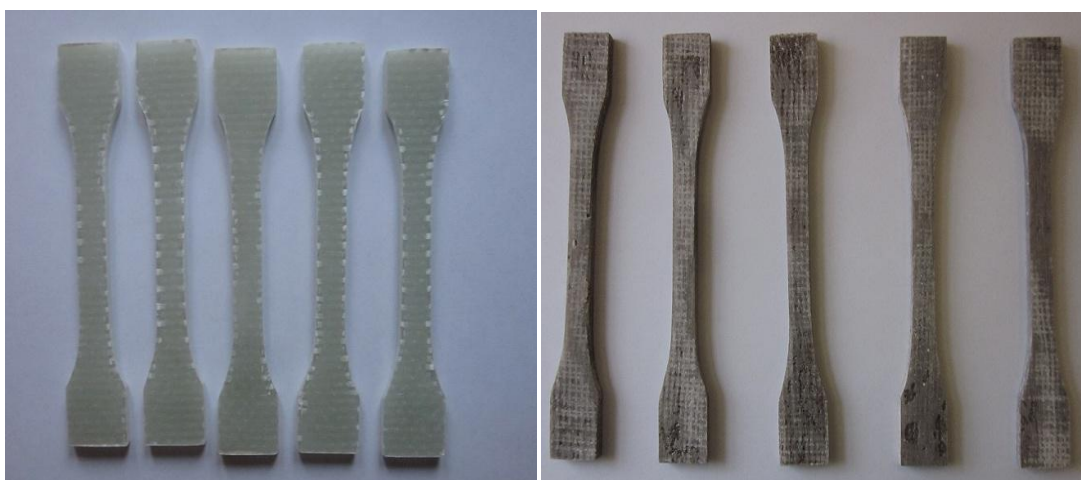


Slika 26. Postupak izrade kompozitnih ploča



Slika 27. Slika izrađenih kompozitnih ploča

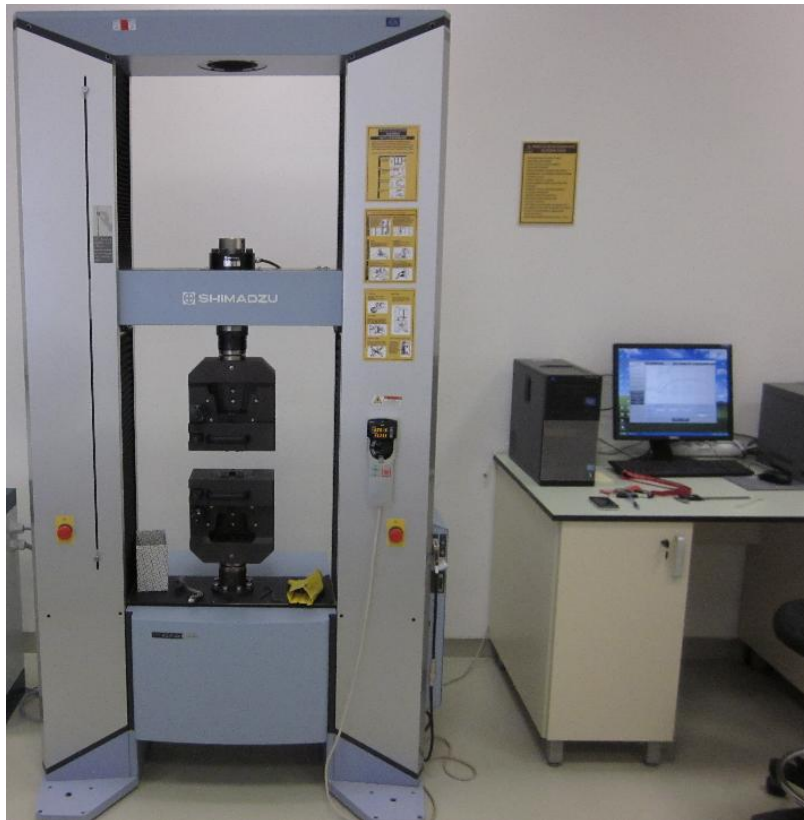
Nakon izrade ploča, slijedi izrada uzoraka (epruveta) za ispitivanje statičko mehaničke vlačne čvrstoće. Iz izrađenih kompozitnih ploča uzorci su izrezani ručnom pilom nakon čega ih je bilo potrebno brusiti brusnim papirom, kako bi dobili odgovarajuće dimenzije za ispitivanje. Ukupno je napravljeno deset uzoraka, pet sa staklenim vlaknima i pet sa jutenim vlaknim (slika 28).



Slika 28. Gotovi uzorci

8.2. Ispitivanje statičke vlačne čvrstoće

U labaratoriju Veleučilišta u Karlovcu na kidalici Shimadzu AG-X (slika 29) provedeno je statičko vlačno ispitivanje. Računalom upravljana kidalica u računalnom programu Trapezium X (slika 30) za testiranje materijala omogućava provođenje ispitivanja i zapisivanja rezultata u elektronskom obliku, kao i dobivanje Hookov-a dijagrama na temelju dobivenih rezultata ispitivanja materijala. Nakon pokretanja programa odabire se vrsta ispitivanja i smjer sile (slika 31) i parametri koji će se mjeriti tijekom ispitivanja (slika 32). Zatim se upisuje vrsta materijala i oblik epruvete (slika 33), u ovom slučaju radi se o polimernom materijalu četvrtastog poprečnog presjeka. Kao zadnji parametar određuje se brzina ispitivanja (slika 34).



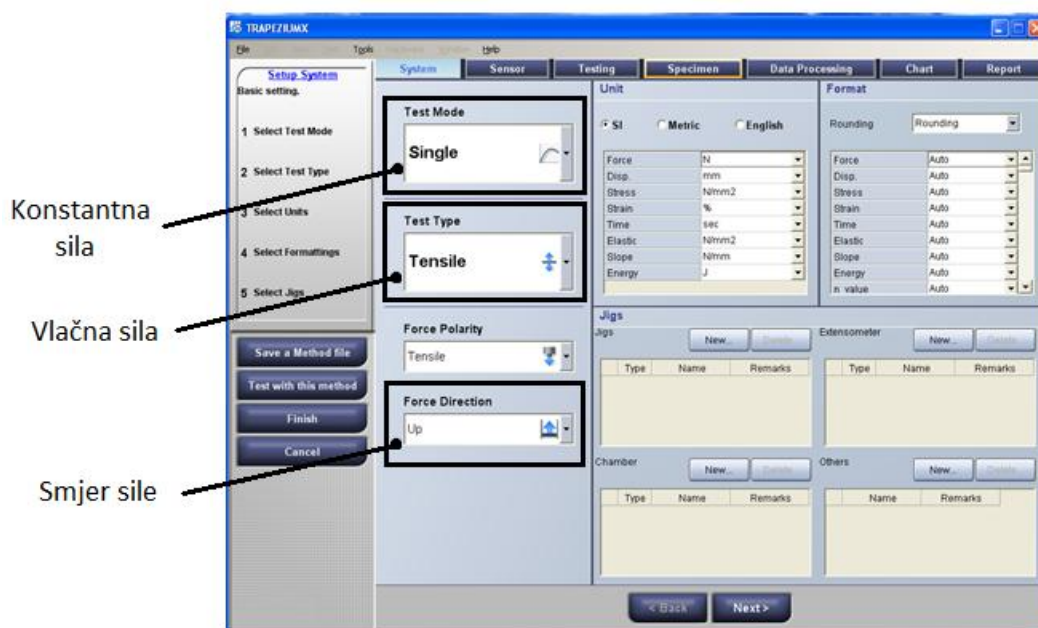
Slika 29. Uređaj za statičko vlačno ispitivanje (Shimadzu AG-X)

Neke specifikacije kralice Shimadzu AG-X:

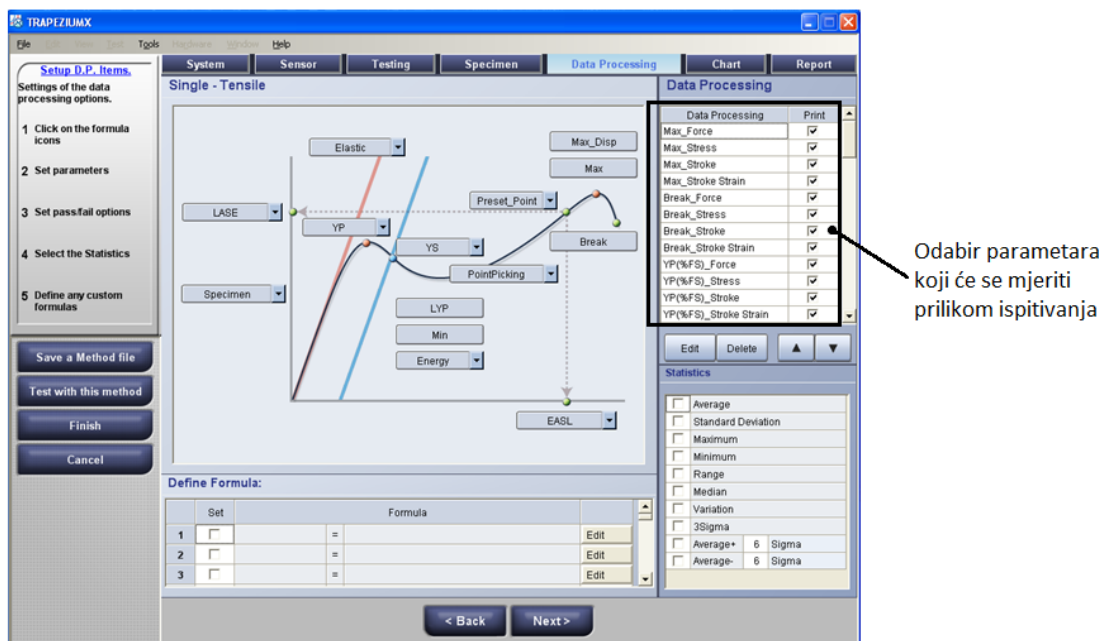
- mjerno područje: do 100kN,
- ispitivanje na vlak, tlak i savijanje,
- mogućnost ispitivanja plosnih epruveta 0-21 mm (100/50kN),
- mogućnost ispitivanja okruglih epruveta D4-D24 (100/50kN).



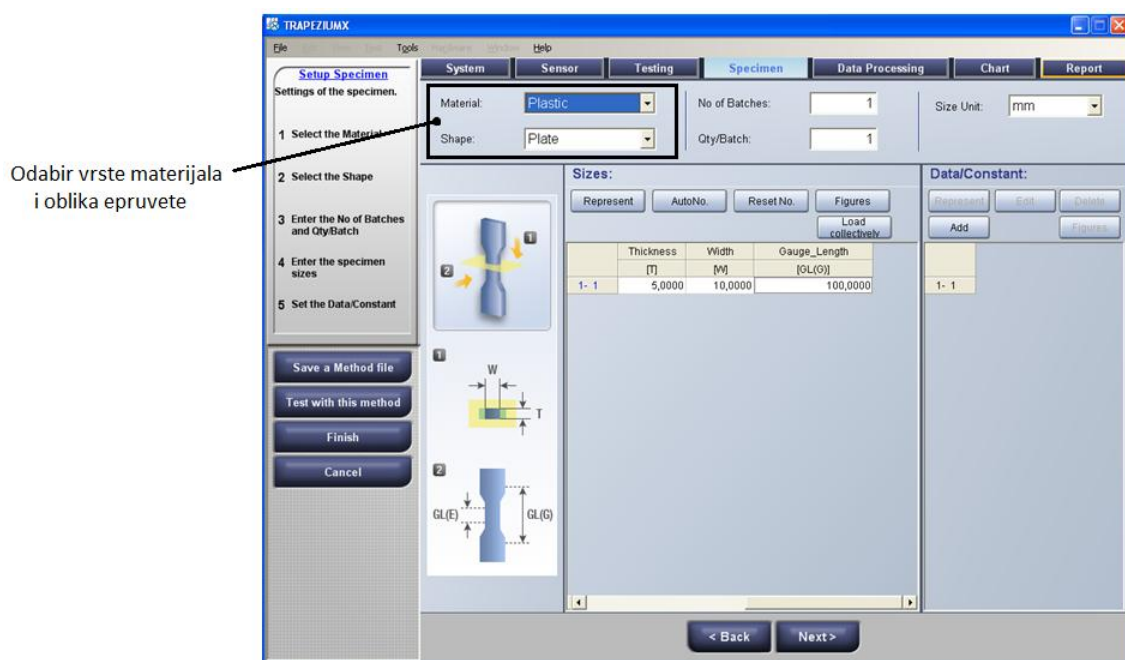
Slika 30. Trapezium X računalni program za testiranje materijala



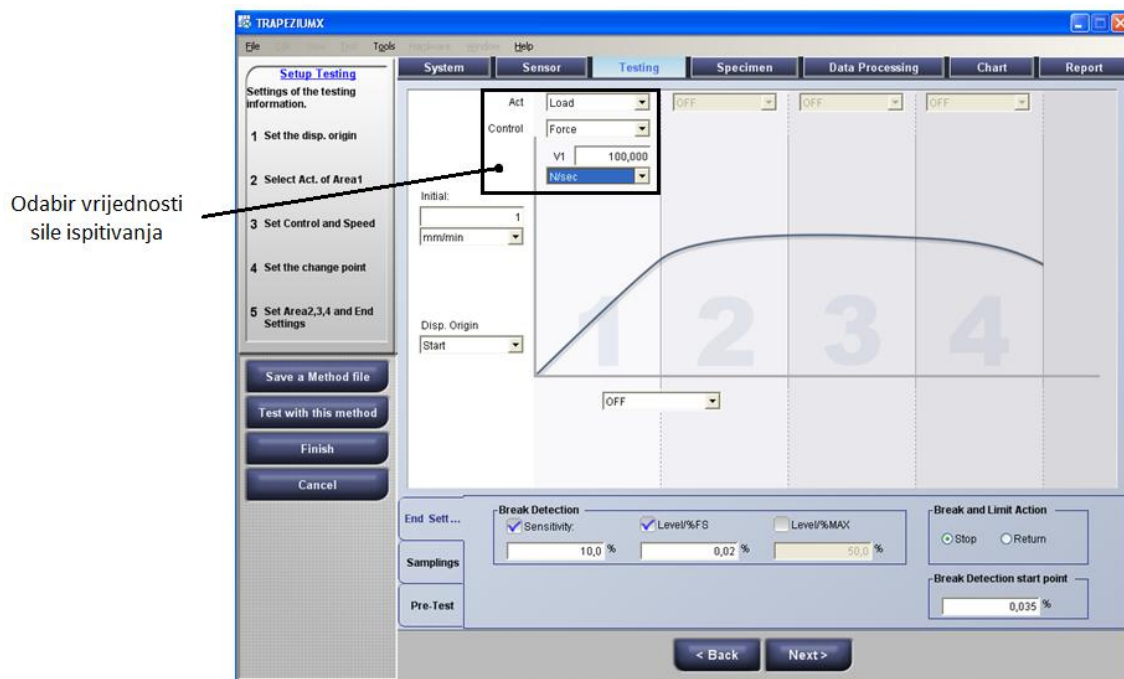
Slika 31. Odabir konstantne vlačne sile



Slika 32. Odabir parametara koji će se mjeriti prilikom ispitivanja



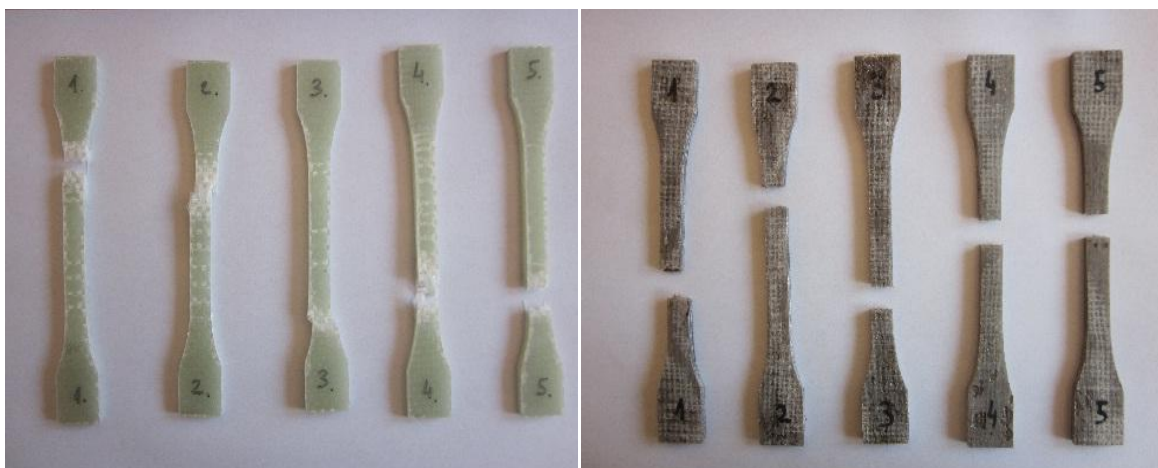
Slika 33. Odabir vrste materijala i oblika epruvete



Slika 34. Odabir vrijednosti sile ispitivanja

8.3. Rezultati ispitivanja

Na slici 35. prikazan je izgled uzoraka kompozita s staklenim i jutenim vlaknima nakon ispitivanja. U tablicama 9. i 10. dani su rezultati vlačnog ispitivanja.



Slika 35. Izgled uzoraka kompozita s staklenim (lijevo) i jutenim (desno) vlaknima nakon ispitivanja

Tablica 9. Rezultati ispitivanja kompozita (epoksidna smola s staklenim vlaknima)

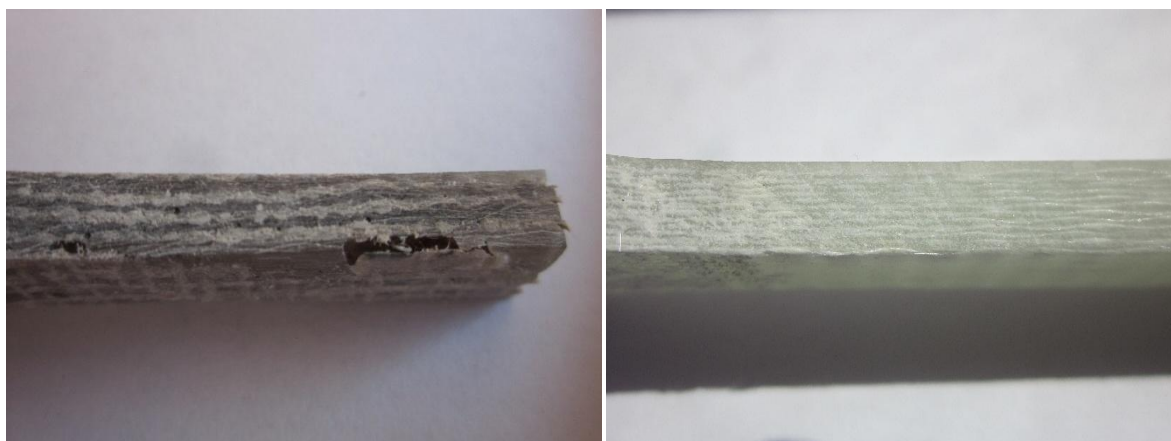
Ispitni uzorak	Kompozit 1	Kompozit 2	Kompozit 3	Kompozit 4	Kompozit 5
Maksimalna sila (N)	13937,8	14779,1	12127,4	15655,4	13469,8
Vlačna čvrstoća (N/mm ²)	278,756	295,582	242,548	313,108	269,396
Najveće istezanje (mm)	5,03842	4,61981	4,31908	4,75196	4,34081
Najveće izduženje (%)	5,03842	4,61981	4,31908	4,75196	4,34081
Sila loma (N)	13898,4	14384,3	12104,7	15347,8	13309,8
Naprezanje kod loma (N/mm ²)	277,968	287,686	242,095	306,956	266,195
Istezanje kod loma (mm)	5,04119	4,63252	4,32775	4,77127	4,35175
Izduženje kod loma (%)	5,04119	4,63252	4,32775	4,77127	4,35175

Tablica 10. Rezultati ispitivanja kompozita (epoksidna smola s jutenim vlaknima)

Ispitni uzorak	Kompozit 1	Kompozit 2	Kompozit 3	Kompozit 4	Kompozit 5
Maksimalna sila (N)	1543,36	2331,43	2226,77	1972,88	2512,19
Vlačna čvrstoća (N/mm ²)	30,8673	46,6286	44,5353	39,4576	50,2437
Najveće istezanje (mm)	1,85585	2,85048	2,37860	2,54625	2,48135
Najveće izduženje (%)	1,85585	2,85048	2,37860	2,54625	2,48135
Sila loma (N)	1543,36	2331,43	2226,77	1972,88	2512,19
Naprezanje kod loma (N/mm ²)	30,8673	46,6286	44,5353	39,4576	50,2437
Istezanje kod loma (mm)	1,85585	2,85048	2,37860	2,54625	2,48135
Izduženje kod loma (%)	1,85585	2,85048	2,37860	2,54625	2,48135

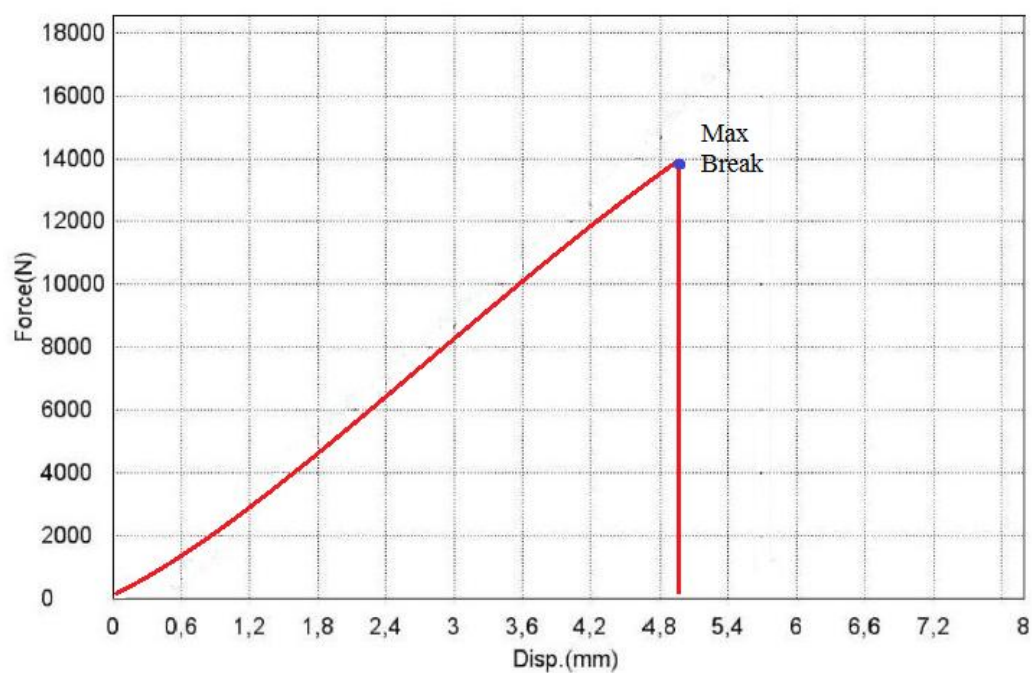
8.4. Analiza rezultata

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da kompozit sa staklenim vlaknima ima znatno veću vlačnu čvrstoću od kompozita s jutenim vlaknima, što odgovara podacima iz tablice 4. Na slici 36. vidljivo je kako su slojevi vlakana raspoređeni kod oba kompozita. Kompozit s jutenim vlaknima (na slici lijevo) ima puno nepravilniji raspored vlakana i samim time veća je mogućnost nastajanja zaostalih mjehurića zraka koji dodatno loše utječu na svojstva (vidljivo u tablicama 9 i 10), gdje vlačna čvrstoća kompozita sa jutenim vlaknima mnogo više oscilira u odnosu na kompozit s staklenim vlaknima.



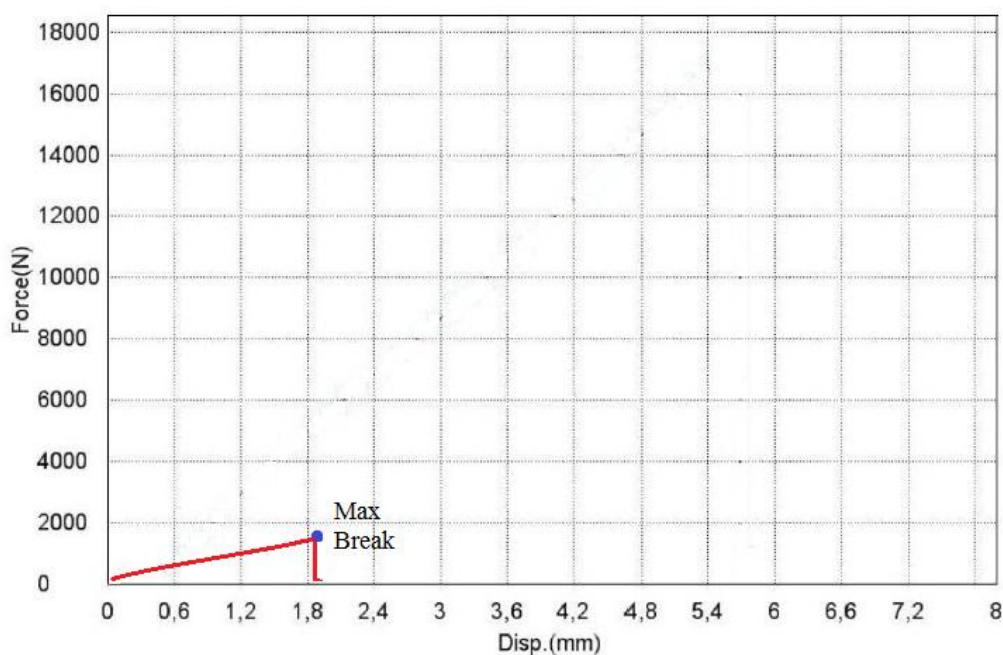
Slika 36. Slojevi vlakana kod kompozita sa jutenim i staklenim vlaknima

Na slici 37. prikazan je Hookeov dijagram za kompozit 1 sa staklenim vlaknima. Iako je iz dijagrama vidljivo da je maksimalna sila jednaka sili loma, te da je maksimalno istezanje jednako istezanju kod loma, rezultati u tablici 9. ukazuju da je prilikom samog loma došlo do popuštanja i smanjenja poprečnog presjeka svih ispitnih uzoraka sa staklenim vlaknima.



Slika 37. Hookeov dijagram za kompozit 1 s staklenim vlaknima

Na slici 38. prikazan je Hookeov dijagram za kompozit 1 sa jutenim vlaknima. Na dijagramu je vidljivo da je maksimalna sila jednaka sili loma i da je maksimalno istezanje jednako istezanju prilikom loma što odgovara rezultatima iz tablice 10. Na slici 39. vidi se da je došlo do raslojavanja vlakana (pucaanje veze vlakno-matrica) i da je sama površina loma vrlo nepravilna za razliku od površine loma kompozita sa jutenim vlaknima.



Slika 38. Hookeov dijagram za kompozit 1 s jutenim vlaknima



Slika 39. Površine loma za kompozite 1 sa jutenim i staklenim vlaknima

9. ZAKLJUČAK

Biokompoziti su kompozitni materijali načinjeni od prirodnih vlakana i polimerne matrice. Iako kompoziti s staklenim vlaknima imaju vrlo dobra svojstva jedan od najvećih njihovih nedostataka je recikliranje pa stoga kompoziti koji su ojačani prirodnim vlaknima u današnje vrijeme se sve češće upotrebljavaju zato što su jeftiniji, manje zagađuju okoliš, lakše se recikliraju, ne ovise o oskudnim resursima, potrebno je puno manje energije za njihovu proizvodnju.

Za potrebe završnog rada izrađene su dvije kompozitne ploče, kao matrica koristila se dvokomponentna epoksidna smola, a kao ojačalo staklena i jutena vlakna.

U radu je izvršeno statičko vlačno ispitivanje na pet uzoraka sa jutenim i pet uzoraka s staklenim vlaknima. Kao što se pretpostavljalo staklena vlakna su se pokazala boljim ojačalom, vlačna čvrstoća je bila znatno veća kod kompozita ojačanog staklenim vlaknima. Iako su rezultati bili očekivani jasno se može vidjeti da kompozit s jutenim vlaknima može imati puno bolja svojstva ukoliko bi se koristila neka druga tehnika izrade kompozita s kojom bi uklonili nedostatke ručnog polaganja.

LITERATURA

- [1] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof : Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [2] N. Sonički : Tehnički materijali, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac 2013.
- [3] D. Ćorić, T. Filetin: Materijali u zrakoplovstvu – interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [4] Z. Kolumbić, N. Tomec: Materijali - Kompoziti – nastavni materijali, Filozofski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka , 2005.
- [5] Z. Schauerl: Kompozitni materijali – nastavni materijali, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [6] D. Adamović: Mašinski materijali: Kompozitni materijali – interna skripta, Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac, 2010.
- [7] www.fsb.unizg.hr/kmb/200/230/kmb234.htm, dostupno 18.05.2015.
- [8] P. K. Malick: „Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design“ Taylor & Francis Group LLC, 2007.
- [9] W. Kunej: Poliesterski kompoziti, 2. Prošireno izdanje, Zagreb, 2006.
- [10] C.A. Harper: Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites, McGraw-Hill, 2002.
- [11] I. Grubišić: Konstrukcija malih brodova, 2005.
- [12] B. Andričić: Prirodni polimerni materijali, Split 2008.
- [13] M.Sc. D. Thi Thu Loan: Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices, 2006.
- [14] <https://www.fsb.unizg.hr/polimeri/fileopen.php?id=1119>, dostupno 18.05.2015.
- [15] L. Pomenić: Materijali i tehnološki postupci - Kompoziti – nastavni materijali, Stručni studij elektrotehnike Sveučilišta u Rijeci, Rijeka , 2010.
- [16] I. Smojver: Mehanika kompozitnih materijala – interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2007.
- [17] M. Franz: Kompoziti – nastavni materijali, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2006.
- [18] T. Filetin: Materijali i tehnološki razvoj, Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Zagreb, 2002.
- [19] M. Šercer: Predavanja - Prerada kompozitnih tvorevina, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2008./2009.

- [20] T. Filetin, G. Marić : Napredne tehnologije materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [21] G. Akovali: Handbook of Composite Fabrication, RAPRA Technology LTD., Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, UK, 2001.
- [22] M. Šercer, A. Pilipović: Proizvodnja kompozitnih tvorevina.
<http://www.scribd.com/doc/233375901/Kompozitni-materijali#scribd>, dostupno 21.05.2015.

PRILOZI

Prilog 1. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 1 (kompozit s staklenim vlaknima)

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	Završni rad, Tomislav Mihaljević
Materijal	Kompozit	Količina	5
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	5x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	100 N/sec
Datum ispitivanja	19.02.2015.	Norma	

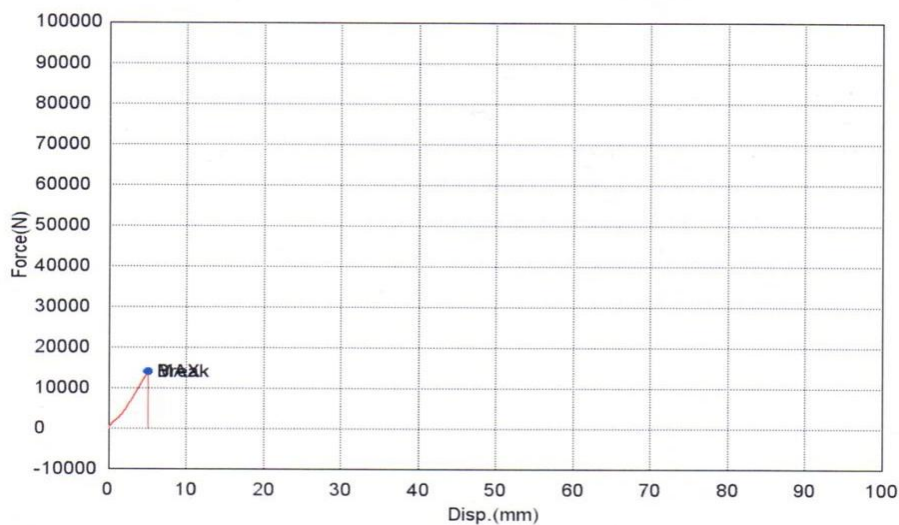
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 1	13937,8	278,756	5,03842	5,03842

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 1	13898,4	277,968	5,04119	5,04119

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 1	-.-	-.-	-.-	-.-

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
Kompozit 1	-.-	-.-	-.-	-.-

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
Kompozit 1	-.-



Comment

Prilog 2. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 2 (kompozit s staklenim vlaknima)

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	Završni rad, Tomislav Mihaljević
Materijal	Kompozit	Količina	5
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	5x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	100 N/sec
Datum ispitivanja	19.02.2015.	Norma	

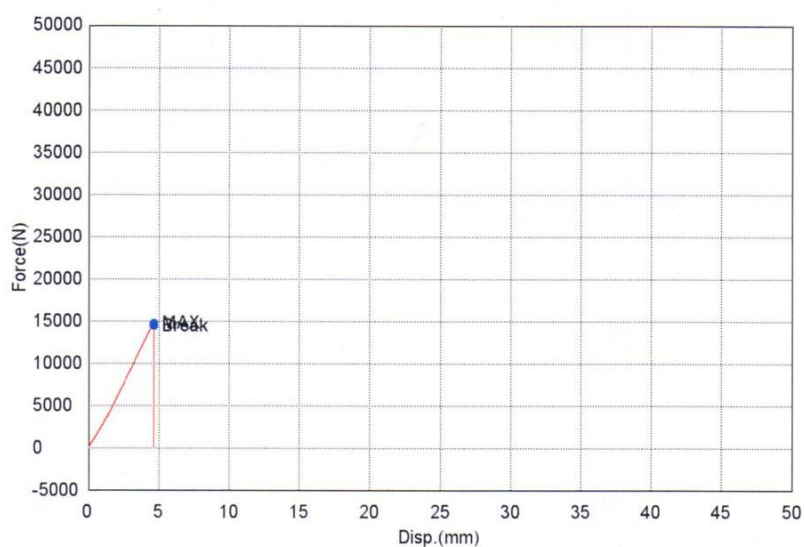
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 2	14779,1	295,582	4,61981	4,61981

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 2	14384,3	287,686	4,63252	4,63252

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 2	--	--	--	--

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
Kompozit 2	--	--	--	--

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
Kompozit 2	--



Comment

Prilog 3. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 3 (kompozit s staklenim vlaknima)

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	Završni rad, Tomislav Mihaljević
Materijal	Kompozit	Količina	5
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	5x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	100 N/sec
Datum ispitivanja	19.02.2015.	Norma	

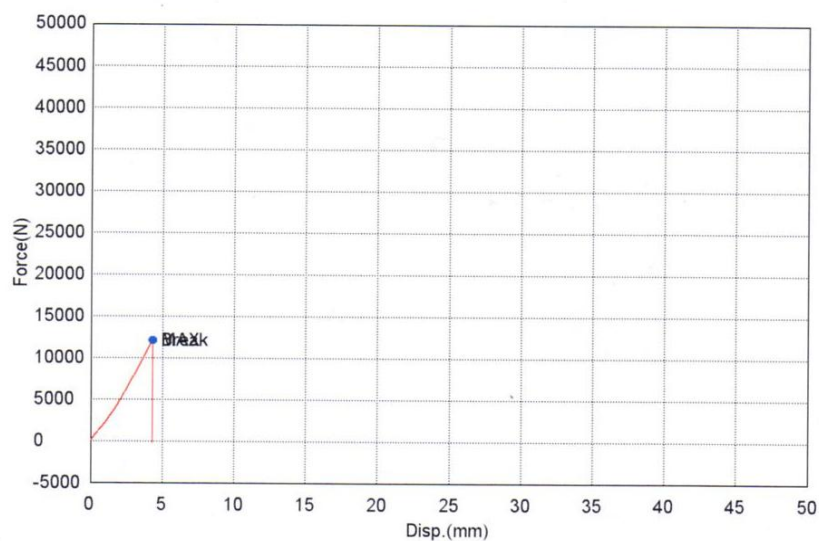
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 3	12127,4	242,548	4,31908	4,31908

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 3	12104,7	242,095	4,32775	4,32775

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 3	-.-	-.-	-.-	-.-

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
Kompozit 3	-.-	-.-	-.-	-.-

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
Kompozit 3	-.-



Comment

Prilog 4. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 4 (kompozit s staklenim vlaknima)

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	Završni rad, Tomislav Mihaljević
Materijal	Kompozit	Količina	5
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	5x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	100 N/sec
Datum ispitivanja	19.02.2015.	Norma	

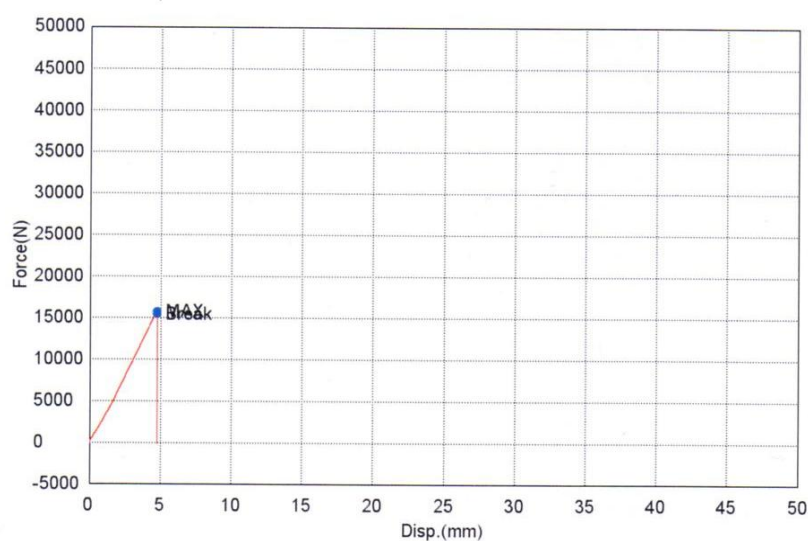
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 4	15655,4	313,108	4,75196	4,75196

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 4	15347,8	306,956	4,77127	4,77127

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 4	-.-	-.-	-.-	-.-

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
Kompozit 4	-.-	-.-	-.-	-.-

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
Kompozit 4	-.-



Comment

Prilog 5. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 5 (kompozit s staklenim vlaknima)

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	Završni rad, Tomislav Mihaljević
Materijal	Kompozit	Količina	5
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	5x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	100 N/sec
Datum ispitivanja	19.02.2015.	Norma	

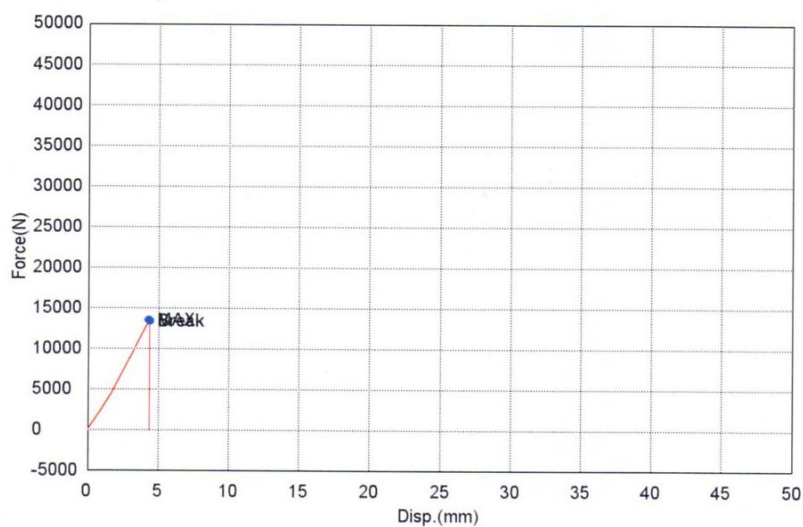
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 5	13469,8	269,396	4,34081	4,34081

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 5	13309,8	266,195	4,35175	4,35175

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 5	--	--	--	--

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
Kompozit 5	--	--	--	--

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
Kompozit 5	--



Comment

Prilog 6. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 1 (kompozit s jutenim vlaknima)

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

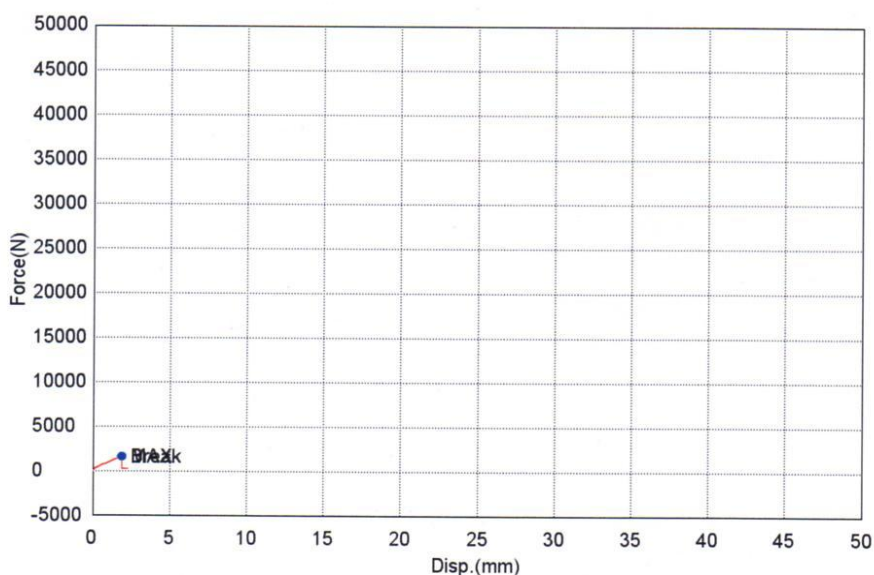
Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	Završni rad, Tomislav Mihaljević
Materijal	Kompozit	Količina	5
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	5x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	100 N/sec
Datum ispitivanja	16.04.2015.	Norma	

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 1	1543,36	30,8673	1,85585	1,85585

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 1	1543,36	30,8673	1,85585	1,85585

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 1	--	--	--	--

Name	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 1	--	--	--	--



Prilog 7. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 2 (kompozit s jutenim vlaknima)

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

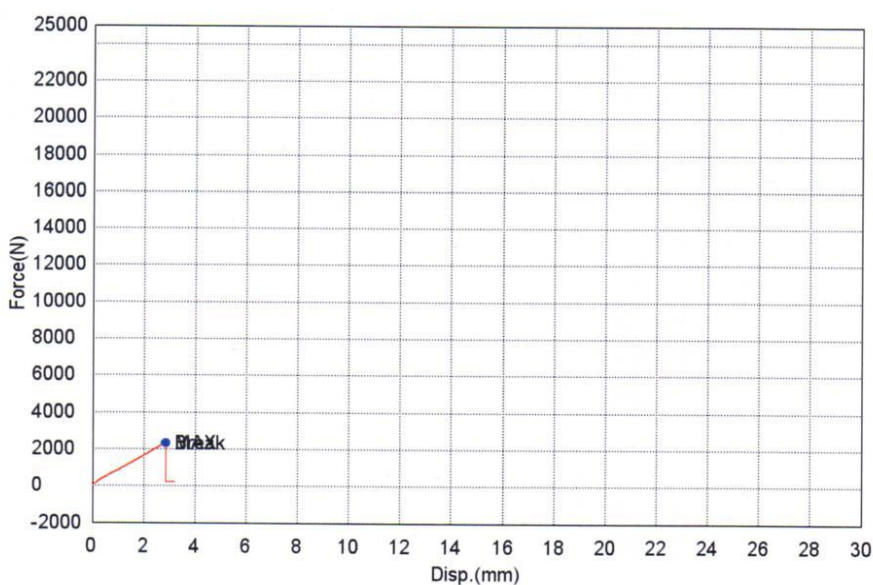
Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	Završni rad, Tomislav Mihaljević
Materijal	Kompozit	Količina	5
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	5x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	100 N/sec
Datum ispitivanja	16.04.2015.	Norma	

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 2	2331,43	46,6286	2,85048	2,85048

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 2	2331,43	46,6286	2,85048	2,85048

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 2	--	--	--	--

Name	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 2	--	--	--	--



Prilog 8. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 3 (kompozit s jutenim vlaknima)

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

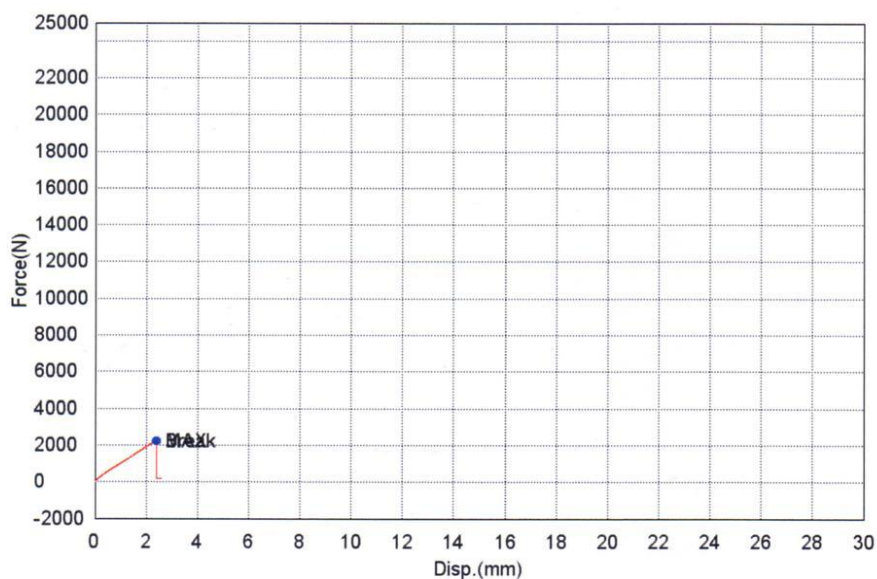
Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	Završni rad, Tomislav Mihaljević
Materijal	Kompozit	Količina	5
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	5x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	100 N/sec
Datum ispitivanja	16.04.2015.	Norma	

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 3	2226,77	44,5353	2,37860	2,37860

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 3	2226,77	44,5353	2,37860	2,37860

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 3	-,-	-,-	-,-	-,-

Name	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 3	-,-	-,-	-,-	-,-



Prilog 9. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 4 (kompozit s jutenim vlaknima)

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

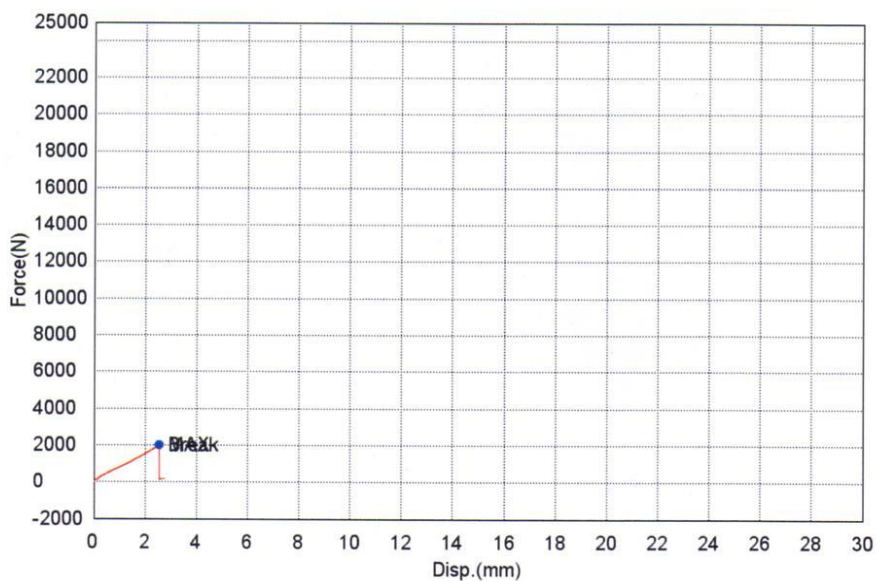
Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	Završni rad, Tomislav Mihaljević
Materijal	Kompozit	Količina	5
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	5x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	100 N/sec
Datum ispitivanja	16.04.2015.	Norma	

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 4	1972,88	39,4576	2,54625	2,54625

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 4	1972,88	39,4576	2,54625	2,54625

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 4	--	--	--	--

Name	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 4	--	--	--	--



Prilog 10. Prikaz izvješća rezultata statičko vlačnog ispitivanja za kompozit 5 (kompozit s jutenim vlaknima)

IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručitelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	Završni rad, Tomislav Mihaljević
Materijal	Kompozit	Količina	5
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	5x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	100 N/sec
Datum ispitivanja	16.04.2015.	Norma	

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 5	2512,19	50,2437	2,48135	2,48135

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 5	2512,19	50,2437	2,48135	2,48135

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 5	--	--	--	--

Name	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
Kompozit 5	--	--	--	--

